

**ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**PROCEEDINGS OF THE
KABARDINO-BALKARIAN
STATE UNIVERSITY**

ТОМ XVI, № 1, 2026

Учредитель: Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова (КБГУ)

Главный редактор **С.Ю. ХАШИРОВА**
Первый зам. главного редактора **А.П. САВИНЦЕВ**
Зам. главного редактора **А.М. КАРМОКОВ**
Зам. главного редактора **Г.Б. ШУСТОВ**
Ответственный секретарь **И.В. ДОЛБИН**

Редакционная коллегия

Ашхотов О.Г., Берлин А.А., Борукаев Т.А., Дедков Г.В., Дышеков А.А., Киреев В.В.,
Кушхов Х.Б., Ломоносов И.В., Ляхов Н.З., Мазуров В.Д., Махнев А.А.,
Музафаров А.М., Сухинов А.И., Хоконов М.Х., Хохлов А.Р.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Реестровая запись от 15.08.2019 г. ПИ № ФС 77-76623.

Подписной индекс в Каталоге «Пресса России» ф 43720.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Доступ к рефератам статей журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки «eLIBRARY.RU» (<http://elibrary.ru>).

ISSN 2221-7789

Адрес редакции: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173,
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

Телефоны: (88662) 722313

E-mail: rio@kbsu.ru, <http://izvestia.kbsu.ru>

© Авторы, 2025б

© Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова, 202б

Founder: Kabardino-Balkarian State University (KBSU)

Editor in chief **S.Yu. KHASHIROVA**
The 1st Deputy Editor **A.P. SAVINTSEV**
Deputy Editor **A.M. KARMOKOV**
Deputy Editor **G.B. SHUSTOV**
Executive secretary **I.V. DOLBIN**

Editorial board

Ashkhotov O.G., Berlin A.A., Borukaev T.A., Dedkov V.G., Dyshekov A.A., Kireev V.V.,
Kushkhov Kh.B., Lomonosov I.V., Lyakhov N.Z., Mazurov V.D., Makhnev A.A.,
Muzafarov A.M., Sukhinov A.I., Khokonov M.Kh., Khokhlov A.R.

Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.
Registre entry dated 15.08.2019. PI No. FS 77-76623

Subscription index in the catalog «Russian Press» F 43720

Access to abstracts of articles of the magazine is carried out on the Scientific Electronic Library Online «eLIBRARY.RU» (<http://elibrary.ru>).

ISSN 2221-7789

Editorial address: Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevsky st., 173, Nalchik, 360004

Phone number: (88662)722313

E-mail: rio@kbsu.ru, <http://izvestia.kbsu.ru>

© Authors, 202б

© Kabardino-Balkarian State University, 202б

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Алоев В.З., Жирикова З.М. Исследование теплопроводности полимерных композитов на основе фенилона в рамках фрактального анализа.....	5
Долбин И.И., Долбин И.В., Давыдова В.В., Чавдарь У.Д. Моделирование степени усиления дисперсно-наполненных композитов полиэтилен/гидроксипатит в рамках фрактального анализа	10
Зуев М.В., Федоров К.М., Чихарева Н.А., Суди И.В. Решение прямых и обратных задач по определению температурного профиля в скважине с интеллектуальными системами заканчивания	15
Кунижев Б.И., Хаджиева М.Т., Жамбеков А.А., Гайтукиева З.Х., Жабоев Ж.Ж. Моделирование тепловых процессов в биоматериалах с использованием метода Монте-Карло.....	21
Масаев М.Б., Байсиев Т.М., Масаев А.М., Гангапшев А.М., Савинцев А.П. Характеристики модифицированного сцинтилляционного детектора на основе большого кристалла NaI(Tl) для измерения активности радона в воздухе.....	25
Масаев А.М., Реуцкая Н.С., Коков З.А., Калажиков Х.Х., Коротков П.К., Ахкубекова С.Н. Ориентационная зависимость параметров двойного электрического слоя поверхности адсорбционной системы W-Cs	30
Хамдохов З.М., Маргушев З.Ч., Лосанов Х.Х., Тешев Р.Ш. Оценка работы выхода электронов из углеродной пленки, полученной электродуговым распылением графита в магнитном поле	34
Шостаков Н.А. Параметр неравновесности гидратообразования и его применение для интерпретации состава гидратной фазы	38

ХИМИЯ

Алтуева А.М., Кожемова К.Р., Алтуев М.Х., Мирзоева Н.М. Влияние графеновых наночастиц на прочность полилактида при его модификации	42
Алтуева А.М., Токумаева Ж.Х., Алтуев М.Х., Машуков Н.И. Модификация и переработка полиэтилена: современные подходы и перспективы развития	48
Бесланеева З.Л., Хутов А.М., Иругова Л.О., Иругова А.М., Хасмегова Э.Ж., Кярова Д.А., Тюбеева Т.А. Разработка органоглинистых модификаторов для полимерных нанокомпозитов с заданными свойствами	53
Болотников И.С., Косенко Е.А., Баурова Н.И. Влияние режимов фрезерования на усталостную прочность модифицированных углепластиков при критических условиях эксплуатации	57
Борукаев Т.А., Тохова Л.М., Газаев Э.Б., Шорова З.А. Исследование термических свойств смесей антипиренов на основе полифосфата аммония, меламина и дипентаэритрита	62
Кокоева А.А., Малкандуев Ю.А., Шокарова М.М., Каканаева М.Х. Исследование комплексобразующих свойств кватернизированных аммониевых солей	67
Мусаев Ю.И., Мусаева Э.Б., Кожемова К.Р., Байказиев А.Э., Виндижева А.С., Портова А.Р., Пак С.Д. Пирролсодержащие гетероциклические соединения: современные подходы и перспективные направления	73
Требования к оформлению научной статьи, представляемой в журнал «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета»	78

CONTENTS

PHYSICS

Aloev V.Z., Zhirikova Z.M. Study of thermal conductivity of phenylone-based polymer composites within the framework of fractal analysis	5
Dolbin I.I., Dolbin I.V., Davydova V.V., Chavdar U.D. Modeling the reinforcement degree of dispersed-filled polyethylene/ hydroxyapatite composites within the framework of fractal analysis...	10
Zuev M.V., Fedorov K.M., Chikhareva N.A., Sudi I.V. Solving direct and reverse thermodynamic problems for determining fluid flow parameters in wells with intelligent completion system	15
Kunizhev B.I., Khadzhieva M.T., Zhabekov A.A., Gaitukieva Z.K., Zhaboev Z.Z. Modeling of thermal processes in biomaterials using the monte carlo method.....	21
Masaev M.B., Baysiev T.M., Masaev A.-G.M., Gangapshev A.M., Savintsev A.P. Characteristics of a modified scintillation detector based on a large NaI(Tl) crystal for measuring the activity of radon in air.....	25
Masayev A.-G.M., Reutskaya N.S., Kokov Z.A., Kalazhokov Kh.Kh., Korotkov P.K., Akhkubekova S.N. Orientational dependence of the parameters of the double electric layer of the surface of the adsorption system W-Cs.....	30
Khamdokhov Z.M., Margushev Z.Ch., Losanov Kh.Kh., Teshev R.Sh. Evaluation of the work function of electrons from a carbon film obtained by electric arc sputtering of graphite in a magnetic field	34
Shostak N.A. The parameter of nonequilibrium hydrate formation and its application to interpret the composition of the hydrate phase.....	38

CHEMISTRY

Altueva A.M., Kozhemova K.R., Altuev M.Kh., Mirzoeva N.M. Influence of graphene nanoparticles on the strength of polylactide during its modifications.....	42
Altueva A.M., Tokumaeva Zh.Kh., Altuev M.Kh., Mashukov N.I. Modification and processing of polyethylene: modern approaches and development prospects.....	48
Beslaneeva Z.L., Khutov A.M., Irugova L.O., Irugova A.A., Khasmegova E.A., Kyarova D.A., Tyubeeva T.A. Development of organic clay modifiers for polymer nanocomposites with specified properties	53
Bolotnikov I.S., Kosenko E.A., Baurova N.I. Influence of milling modes on the fatigue strength of modified carbon fiber reinforced plastics under critical operating conditions.....	57
Borukaev T.A., Tokhova LM., Gazaev E.B., Shorova Z.A. Study of thermal properties of mixtures of fire retardants based on ammonium polyphosphate, melamine and dipentaerythritol.....	62
Kokoeva A.A., Malkanduev Yu.A., Shokarova M.M., Kakanaeva M.Kh. Investigation of the mould-forming properties of quaternized ammonium salts.....	67
Musaev Yu.I., Musaeva E.B., Kozhemova K.R., Baikaziev A.E., Vindizheva A.S., Portova A.R., Pak S.D. Pyrrole-containing heterocyclic compounds: modern approaches and promising directions.....	73
The demand to the design of the scientific article, represented in the journal «Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University»	78

ФИЗИКА

Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 1. С. 5–9.
Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University. 2026. Vol. 16, no. 1. P. 5–9.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 620.22

Исследование теплопроводности полимерных композитов на основе фенилона в рамках фрактального анализа

Владимир Закиевич Алоев¹, Заира Муссавна Жирикова²

^{1,2} Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, Нальчик, Россия

¹ aloev56@list.ru

² zaira.dumaeva@mail.ru

Аннотация. Показано, что коэффициент теплопроводности углепластиков на основе фенилона может быть описан в рамках фрактального анализа. В зависимости от размерности каркаса (системы) волокон наполнителя, такое описание можно получить применением двух предельных случаев: случайной сетки резисторов (ССР) и случайной сверхпроводящей сетки (ССС). Получено, что в случае сверхпроводящей сетки коэффициент теплопроводности контролируется фрактальной размерностью блуждания или числом доступных для этого процесса мест каркаса волокон наполнителя.

Ключевые слова: теплопроводность, композит, фрактальный анализ, углепластик, фрактальная размерность, коэффициент теплопроводности, фактор ориентации, случайная сетка резисторов, случайная сверхпроводящая сетка

Для цитирования: Алоев В.З., Жирикова З.М. Исследование теплопроводности полимерных композитов на основе фенилона в рамках фрактального анализа // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 5–9.

PHYSICS

Original article

Study of thermal conductivity of phenylone-based polymer composites within the framework of fractal analysis

Vladimir Z. Aloev¹, Zaira M. Zhirikova²

^{1,2} Kabardino-Balkarian State Agricultural University, Nal'chik, Russia

¹ aloev56@list.ru

² zaira.dumaeva@mail.ru

Abstract. It has been shown that the thermal conductivity of phenylone-based carbon fiber can be described within the framework of fractal analysis. Depending on the size of the core (system) of filler fibers, such a description can be obtained by applying two limiting cases: a case-specific network of resistors and a random superconducting network. It is obtained that in the case of a superconducting network, the thermal conductivity coefficient is controlled by the fractal dimension of the walk or the number of available places for this process of the core of the filler fibers.

Keywords: thermal conductivity, composite, fractal analysis, ug-leplastic, fractal dimension, thermal conductivity coefficient, orientation factor, random resistor grid, random superconducting grid

For citation: Alov V.Z., Zhirikova Z.M. Study of the thermal conductivity of phenylon-based polymer composites using fractal analysis // Proceedings the Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):5–9.

Введение

Для описания теплопроводности полимерных композитов часто используется подход, основанный на допущении, что эти материалы можно рассматривать как систему сопротивлений. Такой подход является универсальным для любого явления проводимости [1]. При теоретическом анализе явлений проводимости в композиционных твердых средах общим и неизбежным является допущение полного геометрического порядка в распределении фаз. Предполагается, что волокна распределены в полимерной матрице равномерно на одинаковом расстоянии и параллельно друг другу. Однако реальные композитные материалы, полученные в результате выполнения целого комплекса технологических операций, имеют структуру, значительно отличающуюся от идеальной модели. Кроме того, недостаточные знания свойств самих волокнистых наполнителей и матрицы, в свою очередь, накладывают дополнительные ограничения на возможности применения теоретических уравнений для прогнозирования теплофизических свойств композиционных материалов [1]. Поэтому для описания теплопроводности композитов часто используют коэффициент объемной проводимости системы волокон, который учитывает не только физические свойства, но и геометрические особенности композиционного материала. Авторы [2] использовали рассмотренный подход для описания теплопроводности углепластиков на основе фенилона. Однако, рассмотренный выше метод описания теплопроводности композитов не является единственным.

В связи с этим, цель данной работы – применение фрактального анализа для описания теплопроводности полимерных композитов на основе фенилона.

Методы и объекты исследования

В качестве полимерного связующего использован ароматический полиамид-фенилон С-2 (ТУ 6-05-226-72), имеющий температуру стеклования 553 К, в виде мелкодисперсного порошка с насыпной плотностью 330 кг/м³ [3]. В качестве наполнителя использовалось высокомодульное углеродное волокно (УВ) марки «Урал 15» (диаметр 7–9 мкм, длина 3 мм, плотность 1320 кг/м³). Массовое содержание УВ в исследуемых образцах составляло 15 %, что соответствует объемному наполнению $\varphi_n \approx 0,115$.

Образцы для испытаний готовили «сухим» способом, включающим смешение компонентов во вращающемся электромагнитном поле. Для этого в реактор загружали порошкообразный полимер, УВ и неравновесные ферромагнитные частицы длиной 40 мкм. Далее реактор помещали в расточку генератора электромагнитного аппарата. Под воздействием вращающегося электромагнитного поля ферромагнитные частицы начинают вращаться, сталкиваясь между собой, в результате чего УВ равномерно (хаотически) распределяются в полимерной матрице. В результате соударений частицы истираются, и продукты износа попадают в композицию. Для удаления ферромагнитных частиц после смешивания использовали два метода: магнитной и механической сепарации [4].

Определение коэффициента теплопроводности композитов производилось на измерителе ИТ-λ-400 в соответствии с ГОСТ 23630.2-79. Для измерений использовались образцы в форме диска диаметром 15±0,3 мм, высотой 3±0,1 мм. Контактная поверхность исследуемого образца была ровной, гладкой, без раковин, трещин и других дефектов. Торцевые поверхности были перпендикулярны его продольной оси.

Результаты исследования

В рамках фрактального анализа для описания системы частиц (агрегатов частиц) наполнителя используется фрактальная размерность каркаса частиц наполнителя D_k , которая характеризует плотность заполнения пространства полимерной матрицы частицами или волокнами наполнителя [4, 5]. Фрактальная модель полимерных композитов представляется в виде случайной смеси компонентов **A** и **B**, в которой имеются хорошо и плохо проводящие участки [6]. Эта модель полностью соответствует полимерным композитам, у которых коэффициенты теплопроводности углеродных волокон и полимерной матрицы могут различаться на три порядка [1]. Особого внимания заслуживают два предельных случая этой задачи [5]:

1. Случайная сетка резисторов (ССР) или предел «муравья». В этом случае предполагается, что участки, занятые хорошим проводником **A**, имеют проводимость, равную единице, а занятые плохим проводником **B** – нулевую проводимость. Коэффициент теплопроводности λ_T для этого случая определяется соотношением [6]

$$|\lambda_T| \gg L^{d_u}, \quad (1)$$

где L – размер кластера, d_u – фрактальная размерность неэкранированного периметра кластера.

2. Случайная сверхпроводящая сетка (ССС) или предел «термита». В этом случае проводимость хорошего проводника **A** равна бесконечности, плохого проводника **B** – единице. Коэффициент теплопроводности λ_T для этого случая определяется соотношением [6]

$$|\lambda_T| \gg L^{d_u - D_k}, \quad (2)$$

где D_k – фрактальная размерность каркаса волокон наполнителя.

Величина фрактальной размерности d_u неэкранированного периметра кластера определяется из уравнения [7]

$$d_u = (D_k - 1) + \frac{\alpha d - D_k}{\epsilon} \frac{\delta}{\delta}, \quad (3)$$

где d – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал (очевидно, в нашем случае $d = 3$), d_w – размерность блуждения на фрактале, которую можно оценить согласно правилу Александра – Орбаха [8]:

$$d_w = \frac{3}{2} D_k. \quad (4)$$

Размерность D_k каркаса частиц наполнителя для исследуемых углепластиков можно рассчитать с помощью уравнения [8]:

$$j_{\text{мф}} = \frac{1,20(D_k - 2)}{d_n}, \quad (5)$$

где $\phi_{\text{мф}}$ – относительная доля межфазных областей, d_n – фрактальная размерность поверхностных частиц (агрегатов частиц).

На рисунке 1 приведена зависимость коэффициента теплопроводности λ_T от параметра L^{d_u} , где величина L произвольно принята равной 5 относительных единиц.

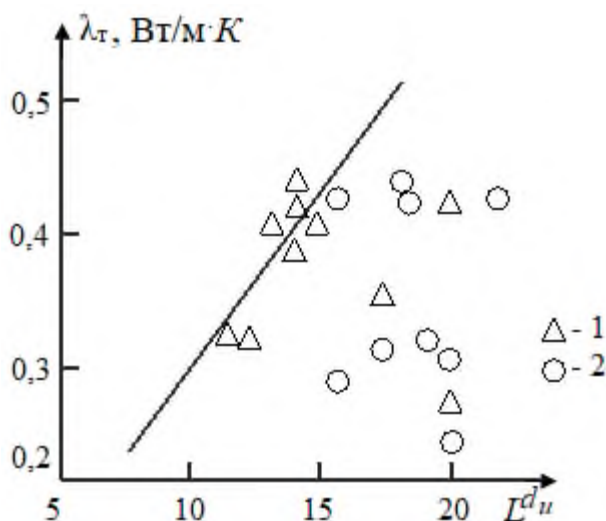


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента теплопроводности λ_T от параметра L^{d_u} для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической (2) сепараций

Как видно из *рисунка 1*, при моделировании композита с помощью случайной сверхпроводящей сетки (ССС) половина точек данных ложится на прямую, проходящую через начало координат (на *рисунке 1* не показано начало координат), т.е. согласуется с указанной моделью, а половина точек обнаруживает значительный разброс и не согласуется с моделью ССС. Это обстоятельство позволяет предположить, что вторая группа точек может быть описана с помощью случайной сетки резисторов (ССР). Действительно, приведенная на *рисунке 2* зависимость $\lambda_T(L^\xi)$, где ξ – показатель проводимости, равный d_u в случае ССС и $(d_w - D_k)$ в случае ССР, подтверждает это предположение. Полученные результаты аппроксимируются одной прямой для обеих указанных моделей, которая проходит через начало координат. Определенный разброс данных для зависимости $\lambda_T(L^\xi)$ может быть обусловлен, как минимум, двумя причинами: произвольным выбором размера кластера L и условием $L=\text{const}$, а также приближенной оценкой d_w согласно правилу Александра – Орбаха. Еще одной возможной причиной указанного разброса могут быть вариации теплопроводности полимерной матрицы.

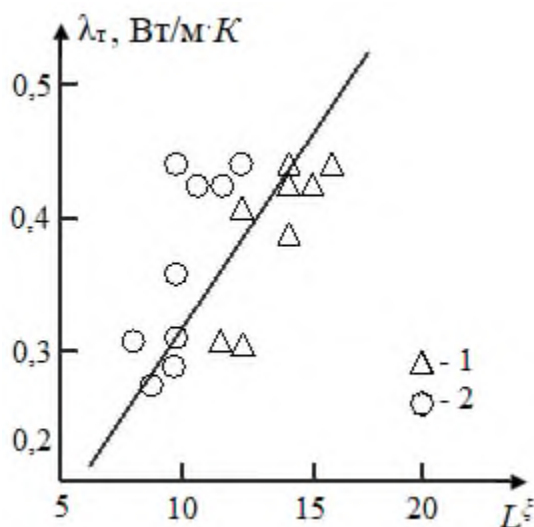


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплопроводности λ_T от параметра L^ξ при $\xi = d_u$ и $\xi = (d_w - D_k)$ для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической (2) сепараций

Переход от одной модели теплопроводности композитов к другой происходит при $D_k \approx 2,62$: при $D_k < 2,62$ корректна модель ССС, а при $D_k > 2,62$ – модель ССР. Отметим, что величина D_k связана с управляющим параметром синергетической структуры углепластиков – фактором ориентации волокон η соотношением [9]

$$h = 0,506(D_k - 2). \quad (6)$$

Таким образом, из соотношения (6) следует, что модель ССС корректна для значений фактора ориентации волокон $\eta < 0,313$, а модель ССР – для $\eta > 0,313$ [10].

Рассмотрим физические предпосылки наблюдаемого перехода от модели ССС к ССР. В предельном случае теплоперенос, обусловленной ССС не имеет геометрических ограничений и может быть реализован как в полимерной матрице, так и в каркасе (системе) волокон. Поэтому в этом случае величина коэффициента теплопроводности λ_T контролируется фрактальной размерностью блужданий d_u или числом доступных для этого процесса мест каркаса волокон наполнителя [7]. В случае ССР теплоперенос в областях с нулевой проводимостью, т. е. в полимерной матрице, невозможен и величина λ_T контролируется размерностью D_k , т. е. размерностью каркаса волокон. На *рисунке 3* приведена зависимость $\lambda_T(D_k)$, которая распадается на два линейных участка, границей которых является размерность $D_k \approx 2,62$ (вертикальная штриховая линия на *рисунке 3*). Для $D_k < 2,62$ (предел ССС) зависимость $\lambda_T(D_k)$ аппроксимируется соотношением [10]

$$l_T = 0,90(D_k - 2), \quad (7)$$

а для $D_k > 2,62$ (предел ССР) аппроксимация зависимости $\lambda_T(D_k)$ имеет вид [10]

$$l_T = 0,51(D_k - 2) \quad (8)$$

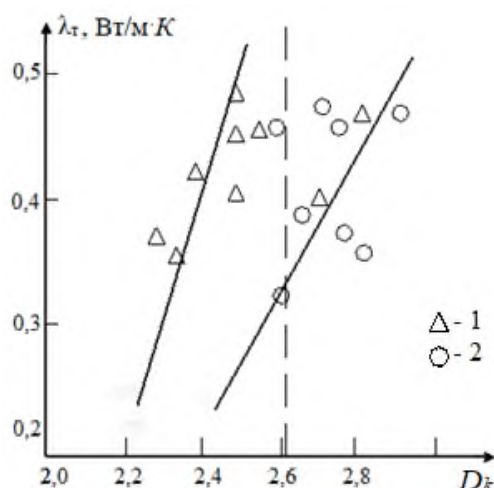


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента теплопроводности λ_t от фрактальной размерности каркаса (системы) волокон наполнителя D_k для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической (2) сепарации. Вертикальная штриховая линия указывает величину D_k , разграничивающую предельные случаи ССС и ССР

Следовательно, в пределе ССС наблюдается более быстрый рост по мере увеличения D_k чем в пределе ССР. Такой вывод непосредственно следует из сравнения соотношений (1) и (2), поскольку для рассматриваемых углепластиков $d_u > (d_w - D_k)$ [10].

Выводы

Таким образом, результаты работы показали, что теплопроводность углепластиков на основе фенилона может быть описана в рамках фрактального анализа. Получено, что в зависимости от размерности каркаса (системы) волокон наполнителя описание модели может быть осуществлено в рамках двух предельных случаев: случайной сетки резисторов (ССР) и случайной сверхпроводящей сетки (ССС).

Библиография

1. Зиблэнд Х. Тепло- и электропроводность полимерных композиционных материалов // Промышленные полимерные композиционные материалы / ред. М. Ричардсон. М.: Химия, 1980. С. 284–319.
2. Козлов Г.В., Буря А.И., Овчаренко Е.Н. Теплопроводность углепластиков на основе фенилона // Известия КБНЦ РАН. 2006. № 1. С. 137–141.
3. Kozlov G.V., Zaikov G.E., Burya A.I., Dolbin I.V. Fractal model of the heat conductivity for carbon fiber-reinforced aromatic polyamide // Journal Of Applied Polymer Science. 2006. V. 100, N 5. P. 3828–3831.
4. Козлов Г.В., Микитаев А.К. Новый подход к фрактальным размерностям структуры полимерных дисперсно-наполненных композитов // Механика композиционных материалов и конструкций. 1996. Т. 2, № 3-4. С. 144–154.
5. Новиков В.У., Козлов Г.В. Фрактальная параметризация структуры наполненных полимеров // Механика композитных материалов. 1999. Т. 35, № 3. С. 269–290.
6. Стенли Х.В. Динамические свойства фрактальных структур // Фракталы в физике / ред. Л. Пьетронеро, Э. Тозатти. М.: Мир. 1988. С. 463–477.
7. Meakin P., Coniglio A., Stanley H.E., Witten T.A. Scaling properties for the surfaces of fractal and nonfractal objects: an infinite hierarchy of critical exponents // Phys. Rev. A. 1986. V. 34, N 4. P. 3325–3340.
8. Alexander S., Orbach R. J. Density of states on fractals: «fractons» // Journal de Physique Lettres. Paris. 1982. V. 43, N 17. P. L625–L631
9. Буря А.И., Козлов Г.В., Рула И.В. Обобщенная методика оценки содержания межфазных областей в полимерных композитах // Новости науки Приднепровья. 2004. № 3. С. 8–11.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 541.64: 539.2

Моделирование степени усиления дисперсно-наполненных композитов полиэтилен/гидроксиапатит в рамках фрактального анализа

Илья Игоревич Долбин¹, Игорь Викторович Долбин², Владлена Вильдановна Давыдова³, Ульяна Дмитриевна Чавдар⁴

^{1,3,4} Российский государственный университет туризма и сервиса, Московская область, дп. Черкизово, Россия

² Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

¹ ilua.06@list.ru

² i_dolbin@mail.ru

³ 9161216171@mail.ru

⁴ chavdar_ulyana@mail.ru

Аннотация. Показано, что корректное описание степени усиления дисперсно-наполненных полимерных микрокомпозитов возможно только на основе номинального объемного содержания наполнителя. Это позволяет прогнозировать данный параметр свойства. Армирующая компонента структуры указанных композитов представляет собой совокупность межфазных областей и собственно наполнителя.

Ключевые слова: композит, гидроксиапатит, межфазные области, дисперсность, армирование, степень усиления

Для цитирования: Долбин И.И., Долбин И.В., Давыдова В.В., Чавдар У.Д. Моделирование степени усиления дисперсно-наполненных композитов полиэтилен/гидроксиапатит в рамках фрактального анализа // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 10–14.

PHYSICS

Original article

Modeling the reinforcement degree of dispersed-filled polyethylene/hydroxyapatite composites within the framework of fractal analysis

Ilya I. Dolbin¹, Igor V. Dolbin², Vladlena V. Davydova³, Ulyana D. Chavdar¹

^{1,3,4} Russian State University of Tourism and Service, Moscow Region, dp. Cherkizovo, Russia

² Kabardino-Balkarian State University, Nal'chik, Russia

¹ ilua.06@list.ru

² i_dolbin@mail.ru

³ 9161216171@mail.ru

⁴ chavdar_ulyana@mail.ru

Abstract. It has been shown that a correct description of the reinforcement degree of dispersed-filled polymer microcomposites can only be obtained based on the nominal volumetric filler content, which opens the possibility of predicting this property. The reinforcing component of the structure of these composites is a combination of interfacial regions and the filler itself.

Keywords: composite, hydroxyapatite, interphase regions, dispersion, reinforcement, reinforcement degree

For citation: Dolbin I.I., Dolbin I.V., Davydova V.V., Chavdar U.D. Modeling the degree of reinforcement of dispersed-filled polyethylene/hydroxyapatite composites within the framework of fractal analysis // Proceedings the Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):10–14.

Введение

В настоящее время хорошо известно, что наиболее сильное отрицательное влияние на свойства полимерных композитов оказывает процесс агрегации исходных частиц наполнителя [1–4]. Однако до последнего времени количественное описание этого эффекта отсутствовало, а используемые трактовки носили чисто описательный характер. Впервые учет воздействия агрегации наполнителя на свойства полимерных композитов был выполнен в работе [5] с применением следующего перколяционного соотношения:

$$\frac{E_k}{E_m} = 1 + 11 \left(\frac{j_n}{c} \right)^{1,7} \chi \quad (1)$$

где E_k и E_m – модули упругости композита и матричного полимера, соответственно (отношение E_k/E_m принято называть степенью усиления композита), j_n – номинальное относительное объемное содержание наполнителя, χ – его степень агрегации.

Ранее авторы [6] получили следующий аналог уравнения (1):

$$\frac{E_k}{E_m} = 1 + 11 (j_n)^{1,7} \quad (2)$$

Из сравнения соотношений (1) и (2) следует, что при $\chi=1,0$ наблюдается их полное тождество, а значения $\chi < 1,0$ означают улучшение свойств композита, в частности, его степени усиления. Поэтому целью настоящей работы является исследование и моделирование влияния степени агрегации χ наполнителя на степень усиления дисперсно-наполненных композитов полиэтилен/гидроксиапатит [7, 8] с использованием представлений фрактального анализа.

Экспериментальная часть

В качестве матричного полимера использован полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) промышленного производства марки Hostalen, поставленный фирмой LyondellBase II Industries (Швейцария). Этот сорт ПЭВП имел плотность 950 кг/м^3 , средневесовую массу $\overline{M}_w = 170 \text{ кг/моль}$, молекулярно-массовое распределение $\overline{M}_w / \overline{M}_n = 12$ и степень кристалличности $0,70$. Наполнителем служил дисперсный порошок гидроксиапатита (ГКА) двух сортов со средним размером исходных частиц $4,14$ и $7,32 \text{ мкм}$. Композиты ПЭВП/ГКА получены методом смешивания компонент в расплаве с использованием лабораторного двухшнекового экструдера модели Haake Minilab-II (Германия) при температуре 483 К и скорости вращения шнеков 150 об/мин в течение 10 мин . Предварительно ПЭВП и ГКА сушились при температуре 333 К . Затем полученные композиты гранулировались и из них получали образцы для испытаний методом горячего прессования при температуре 483 К на прессе «Carver».

Номинальное относительное объемное содержание наполнителя (частиц ГКА) для обеих серий рассматриваемых композитов варьировалось в пределах $0,10\text{--}0,45$ [7].

Механические испытания на одноосное растяжение композитов ПЭВП/ГКА выполнены на тензомере модели Instron 88215 (США) согласно стандарту ISO 527-3 [9]. Использованы образцы в форме двухсторонней лопатки с шириной рабочей части 5 мм , толщиной 2 мм и базовой длиной 25 мм . Испытания выполнены при температуре 295 К и скорости ползуна прибора 10 мм/мин . За результат испытаний принималась средняя величина для пяти измерений [7].

Результаты и обсуждение

Степень агрегации χ в случае дисперсно-наполненных композитов является функцией размера (диаметра) исходных частиц наполнителя $d_{\text{част}}$, что аналитически может быть описано следующим уравнением [10]:

$$c = 2,45 d_{\text{част}} \quad (3)$$

где величина $d_{\text{част}}$ задается в микрометрах.

Применение уравнения (3) дает величину χ , равную ~ 10 для $d_{\text{част}}=4,14$ мкм и $\chi \approx 18$ для $d_{\text{част}}=7,32$ мкм. Однако величина χ сильно ограничена сверху, что определяется критерием [11]:

$$C = \frac{j_n}{j_n + j_{\text{мф}}}, \quad (4)$$

где $j_{\text{мф}}$ – относительное объемное содержание межфазных областей в композите.

Из уравнения (4) нетрудно видеть, что величина χ ограничена сверху тождеством $\chi=1,0$ при отсутствии в композитах межфазных областей или условием $j_{\text{мф}}=0$.

Сочетание уравнений (1) и (4) позволяет получить следующее соотношение [5]:

$$\frac{E_{\kappa}}{E_{\text{м}}} = 1 + 11(j_n + j_{\text{мф}})^{1,7}, \quad (5)$$

которое демонстрирует, что армирующим элементом структуры рассматриваемых композитов ПЭВП/ГКА является совокупность межфазных областей и собственно наполнителя ($j_n + j_{\text{мф}}$).

Авторы [10] продемонстрировали следующую взаимосвязь параметров $j_{\text{мф}}$, j_n и χ :

$$j_{\text{мф}} = \frac{j_n}{C}. \quad (6)$$

При условии $\chi=1,0$ $j_{\text{мф}}=j_n$ и тогда относительное объемное содержание армирующего элемента структуры дисперсно-наполненных композитов можно выразить следующим образом:

$$j_n + j_{\text{мф}} = 2j_n. \quad (7)$$

В рамках фрактального анализа фрактальную размерность D_f структуры агрегатов наполнителя в полимерной матрице композита можно определить с помощью уравнения [10]

$$C = \frac{j_n^{1/2}}{D_f}, \quad (8)$$

или с учетом уравнения (7) и тождества $\chi=1,0$:

$$D_f^2 = 2j_n. \quad (9)$$

Авторы [12] предложили следующее фрактальное соотношение для определения степени усиления $E_{\kappa}/E_{\text{м}}$ полимерных композитов (нанокомпозитов):

$$\frac{E_{\kappa}}{E_{\text{м}}} = 1 + 17D_f^2 j_n \quad (10)$$

или с учетом уравнения (9) и условия $\chi=1,0$ для полимерных микрокомпозитов (композитов с размерами исходных частиц наполнителя микронного масштаба) преобразуется к виду

$$\frac{E_{\kappa}}{E_{\text{м}}} = 1 + 34j_n^2, \quad (11)$$

которое позволяет простое и легкое предсказание степени усиления указанных микрокомпозитов только на основании известных значений j_n .

На *рисунке 1* приведено сравнение рассчитанных теоретически согласно уравнению (11) и полученных экспериментально зависимостей степени усиления $E_{\kappa}/E_{\text{м}}$ от номинального объемного содержания наполнителя j_n для двух серий композитов ПЭВП/ГКА с разным размером частиц исходного наполнителя. Как следует из этого сравнения, получено достаточно хорошее соответствие теории и эксперимента (их среднее расхождение составляет $\sim 9\%$). Отметим, что указанное расхождение меньше погрешности экспериментального определения степени усиления, которая составляет $\sim 13,7\%$ [7, 8].

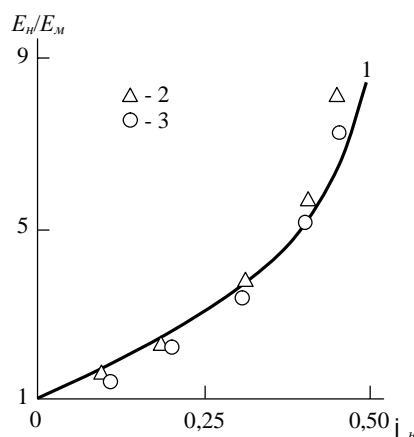


Рисунок 1 – Сравнение рассчитанных теоретически согласно уравнению (11) (1) и полученных экспериментально (2, 3) для композитов ПЭВП/ГКА с размером исходных частиц наполнителя $d_{\text{част}}=4,14$ мкм (2) и 7,32 мкм (3) зависимостей степени усиления E_n/E_m от номинального содержания наполнителя j_n

И в заключение следует подчеркнуть важное следствие, определенное в рамках предложенной модели. В случае микрокомпозитов реализуется пороговая максимальная степень агрегации исходных частиц наполнителя, характеризуемая критерием $\chi=1,0$. Это означает, что изменения указанного размера практически не влияют на свойства этого класса композитов (см. рисунок 1).

Выводы

Следовательно, результаты работы продемонстрировали, что корректное описание степени усиления дисперсно-наполненных полимерных микрокомпозитов можно получить только на основе номинального объемного содержания наполнителя, что делает возможным прогнозирование свойств таких систем. Армирующая компонента структуры указанных композитов представляет собой совокупность межфазных областей и собственно наполнителя. Для случая полимерных микрокомпозитов размер (диаметр) исходных частиц наполнителя практически не оказывает влияния на величину их степени усиления. Степень агрегации для полимерных композитов всегда меньше или равна единице и определяется содержанием межфазных областей.

Библиография

1. Šupova M., Martynkova G.S., Varabaszova K. Effect of nanofiller dispersion in polymer matrices: A review // Sci. Advanced Mater. 2011. V. 3, N 1. P. 1–25.
2. Козлов Г.В., Яновский Ю.Г., Карнет Ю.Н. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных композитов: фрактальный анализ. М.: Альянстраснатом, 2008. 363 с.
3. Магомедов Г.М., Долбин И.И., Козлов Г.В., Долбин И.В. Моделирование степени усиления дисперсно-наполненных полимерных композитов в рамках теории перколяции // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты. Сборник трудов Национальной научно-практической конференции. М., 2025. С. 871–873.
4. Долбин И.И., Кумышева Ю.А., Казанчева Л.А., Долбин И.В., Давыдова В.В. Пропорциональность содержания нанонаполнителя и межфазных областей в полимерных нанокомпозитах // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2025. Т. 15, № 3. С. 34–39.
5. Козлов Г.В., Долбин И.В. Особенности процесса агрегации нанонаполнителя в нанокомпозитах полимер-углеродные нанотрубки // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61, № 2. С. 125–129.
6. Бобрышев А.Н., Козомазов В.Н., Бабин Л.О., Соломатов В.И. Синергетика композитных материалов. Липецк: НПО ОРИУС, 1994. 154 с.
7. Wang M., Berry C., Braden M., Bonfield W. Young's and shear moduli of ceramic particle filled polyethylene // J. Mater. Sci. Mater. Med. 1998. V. 9, N 3. P. 621–624.

8. Fu S.Y., Feng X.Q., Lauke B., Mai Y.-W. Effect of particle size, particle/matrix interphase adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites // Composites. Part B. 2008. V. 39, N 4. P. 933–961.

9. ISO 527-3. Plastics determination of tensile properties. Part 2. Test condition for molding and extrusion plastics. 1995.

10. Атлуханова Л.Б., Долбин И.В. Взаимосвязь свойств и степени дисперсии нанонаполнителя для нанокompозитов полимер/углеродные нанотрубки // Наноиндустрия. 2024. Т. 17, № 1. С. 74–79.

11. Sheng N., Boyce M.C., Parks D.M., Rutledge G.C., Abes J.I., Cohen R.E. Multiscale micromechanical modeling of polymer/clay composites and the effective clay particle // Polymer. 2004. V. 45, N 3. P. 487–506.

12. Козлов Г.В., Ризванова П.Г., Долбин И.В., Магомедов Г.М. Определение модуля упругости нанонаполнителя в матрице полимерных нанокompозитов // Известия ВУЗов. Физика. 2019. Т. 62, № 1. С. 112–116.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 536.6

Решение прямых и обратных задач по определению температурного профиля в скважине с интеллектуальными системами заканчивания

Максим Викторович Зуев¹, Константин Михайлович Федоров², Надежда Александровна Чихарева³, Иосиф Васильевич Суди⁴

^{1,3,4}ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

²Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

¹mvzuev-tnk@rn-gir.rosneft.ru

²k.m.fedorov@utmn.ru

³na_chikhareva@rn-gir.rosneft.ru

⁴iv_sudi2@rn-gir.rosneft.ru

Аннотация. Разработан алгоритм решения прямых и обратных термогидродинамических задач для определения параметров притока жидкости, а также для изучения особенностей работы с данными распределенного измерения температуры (DTS). Работа алгоритма демонстрируется на примере реальных многопластовых и многофазных систем.

Ключевые слова: внутрискважинные системы распределённого измерения температуры (DTS), профиль притока, температура, уравнение энергии, прямая и обратная задача

Для цитирования: Зуев М.В., Федоров К.М., Чихарева Н.А., Суди И.В. Решение прямых и обратных задач по определению температурного профиля в скважине с интеллектуальными системами заканчивания // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 15–20.

PHYSICS

Original article

Solving direct and reverse thermodynamic PROBLEMS for determining fluid flow parameters in wells with intelligent completion system

Maksim V. Zuev¹, Konstantin M. Fedorov², Nadezhda A. Chikhareva³, Iosif V. Sudi⁴

^{1,3,4} Tyumen Oil Research Center LLC, Tyumen, Russia

² Tyumen State University, Tyumen, Russia

¹mvzuev-tnk@rn-gir.rosneft.ru

²k.m.fedorov@utmn.ru

³na_chikhareva@rn-gir.rosneft.ru

⁴iv_sudi2@rn-gir.rosneft.ru

Abstract. An algorithm for solving direct and reverse thermohydrodynamic tasks has been developed in order to define parameters of fluid flow, as well as specifics of working with distributed temperature measurement (DTS) data. The algorithm is demonstrated through an example of real multi-reservoir and multi-phase systems.

Keywords: downhole distributed temperature measurement (DTS) systems, inflow profile, temperature, energy equation, direct and inverse task

For citation: Zuev M.V., Fedorov K.M., Chikhareva N.A., Sudi I.V. Solution of Direct and Inverse Problems in Determining the Temperature Profile in a Well with Intelligent Completion Systems // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):15–20.

Введение

Распределенный датчик температуры (DTS) – это название класса приборов, измеряющих температуру непрерывно через оптическое волокно, проложенное по всей длине ствола скважины. DTS использует физическое явление, такие как рамановского (комбинационного) рассеяния для преобразования температуры в оптический сигнал, что позволяет в дальнейшем выполнить расчет температуры.

Применение DTS позволяет выполнять мониторинг притока флюида по пластам и обнаруживать нежелательный прорыв газа и воды. В то время как другие методы (ПГИ, однофазные расходомеры), дают информацию о потоке [1], ни один из них не обеспечивает непрерывный мониторинг распределения потока в стволе скважины в реальном времени.

Однако измерение температуры само по себе редко бывает конечной целью заказчика. Чаще всего температура – важный компонент термогидродинамических моделей.

Работа с термодинамическими моделями основывается на решении термогидродинамических задач в призабойной зоне скважин. При этом если гидродинамические задачи описываются хорошо зарекомендовавшими себя моделями фильтрации, то уравнение притока тепла часто формулируется некорректно.

Данное исследование ставит своей целью использование корректного уравнения притока тепла, сопровождаемое полным описанием принятых допущений, для решения прямых задач (моделирование притока) и обратных задач термометрии (интерпретация параметров притока) для идентификации притоков и фазового состава флюидов в скважину.

Термогидродинамическая модель притока флюидов в скважину.

Термогидродинамическая модель, описывающая процессы, указанные во введении, состоит из уравнений подземной гидромеханики и гидравлической модели потока в наклонном канале, уравнения притока тепла в пористой среде [2] и в скважине с учетом тепловых потерь в окружающие породы. Первая система уравнений состоит из уравнений сохранения массы i -ой фазы потока без массообмена между фазами и обобщенного закона Дарси без учета капиллярной разности давлений в фазах:

$$\frac{\partial \phi S_i}{\partial t} + \vec{v}(S_i \vec{u}_i) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N), \vec{u}_i = \frac{k k_i(S_i)}{\mu_i} \vec{v}(p + \rho_i \vec{g}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \frac{\partial (\beta_i \vec{u})}{\partial z} = 0, \beta_i = f(\alpha_i) \vec{u} = K_D \frac{\partial (p + \rho_i \vec{g})}{\partial z} + u_r + \Delta p_f, \quad (2)$$

где ϕ – пористость и проницаемость коллектора, S_i – насыщенность матрицы i -ой фазой (нефть, вода, газ), u_i , k_i , μ_i , r_i – поток или скорость фильтрации, относительная фазовая проницаемость, вязкость и плотность i -ой фазы, p , \vec{g} – давление и вектор ускорения свободного падения, α_i , β_i – объемная доля i -й фазы в скважине и в потоке, f – эмпирическая функция, u – общий поток в скважине, K_D – коэффициент Дарси-Вейсбаха, u_r – приток флюида в скважину из продуктивных интервалов, Δp_f – потери на трение потока о стенки скважины, z – вертикальная координата.

Уравнение притока тепла выводится как разность уравнения полной энергии фаз за минусом уравнения сохранения кинетической энергии [3], при допущениях локального термодинамического равновесия фаз:

$$\frac{\partial \sum_i U_i}{\partial t} + \vec{v} u_i (\sum_i H_i) = - \sum_i \lambda_i \Delta T + W \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sum_i U_i}{\partial t} + \vec{v} \vec{u} \beta_i (\sum_i H_i) = - \sum_i \lambda_i \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial t} + W, \quad (5)$$

где U_i , H_i – внутренняя энергия и энтальпия i -ой фазы, $\sum_i \lambda_i$ – средняя теплопроводность пористой среды, T – локальная температура насыщенной пористой среды и средняя по сечению температура потока в скважине, W – работа массовых сил (сил тяжести).

Для реальной жидкости и газа функции внутреннего состояния определяются двумя параметрами:

$$dH_i = c_{pi}(dT + \varepsilon_i dp) \quad (6)$$

$$dU_i = c_{vi}(dT + \eta_i d\rho_i), \quad (7)$$

где ε_i – коэффициент Джоуля Томсона, η_i – адиабатический коэффициент, c_{pi} , c_{vi} – теплоемкости при постоянном давлении и объеме для i -ой фазы. Напомним, что для несжимаемых жидкостей и идеального газа коэффициенты Джоуля Томсона и адиабатический равны нулю [4].

Для расчетов по термогидродинамической модели реальных процессов использовался программный комплекс Emeraude [5].

Постановка прямых и обратных задач

В результате решения прямой задачи определяется профиль давления и температуры в скважине. Решение прямой задачи позволяет имитировать различные сценарии работы пластов и его влияние на профиль температуры, а также для анализа причин несогласованности расчетных и измеренных в скважине параметров [6].

По результатам расчётов определяются параметры притока в скважине с высокой точностью. Однако реальные данные при многофазном потоке зачастую зашумлены. Расчеты показали, что при соотношении амплитуды сигнала к амплитуде шума менее 3,5, температурные аномалии, связанные с интервалами притока, не выделяются.

Технология DTS предоставляет возможность записи профиля температуры с высокой частотой (раз в 1 секунду) [7], что позволяет получить прирост точности путём осреднения большого количества профилей и отсеивания менее устойчивых трендов. В качестве примера на *рисунке 1* приведены профили температуры, полученные в течение 40 мин. В результате усреднения профилей в интервале 40 мин наблюдается снижение амплитуды шумов с 0,5 до 0,06 °С.

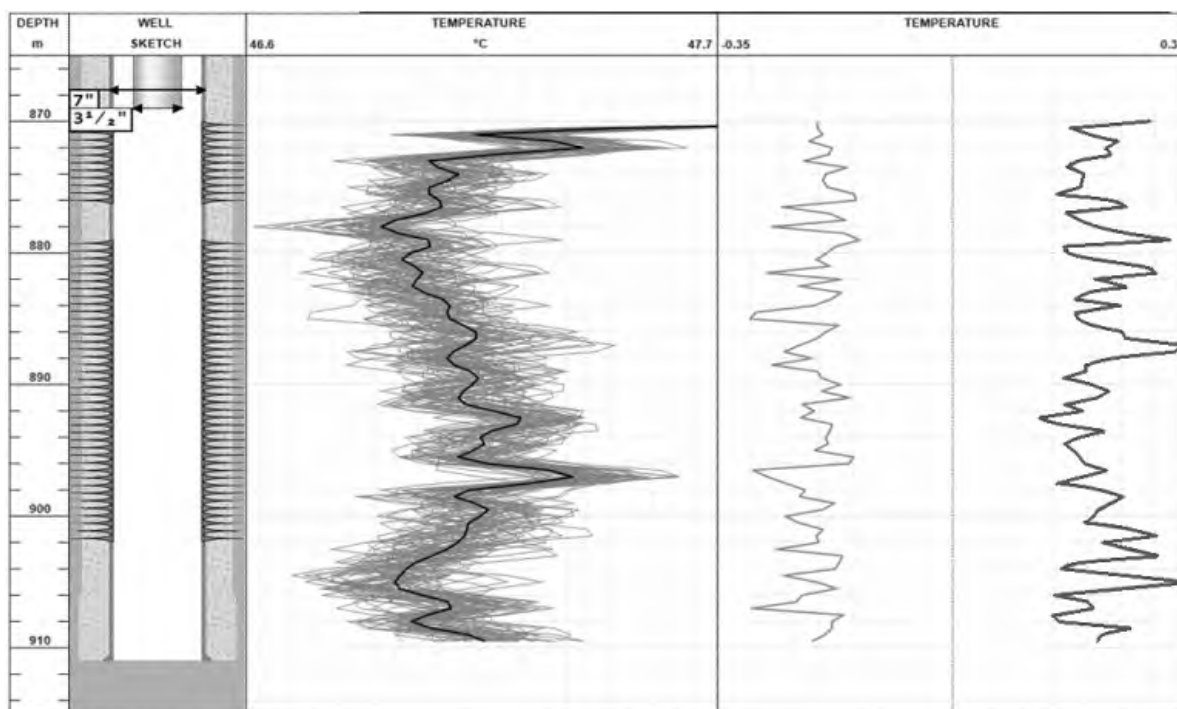


Рисунок 1 – Пример сведения профилей замеров температуры по глубине скважины в интервале притоков (серые кривые) и получения осредненной кривой – черная кривая на интервале замеров 40 мин. Осредненные кривые на меньших интервалах: 10 мин светло-серая кривая, 20 мин – тёмно-серая кривая

Итоговая «эталонная трасса» должна быть выбрана с учетом замеров дебита на тестовом сепараторе. Дебиты с замером через тест-сепаратор на поверхности могут быть использованы в качестве эталонных значений для адаптации модели для пластовых условий.

Первый этап решения прямой задачи – расчет коэффициента теплопотерь из скважины. Для этого необходимо указать параметры конструкции заканчивания и теплофизические свойства. Материал с меньшей теплопроводностью оказывает преобладающее влияние на величину теплопотерь [8].

Для цилиндрических координат это выражение имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k}. \quad (8)$$

Рассматривая полый цилиндр (т. е. трубу) в стационарном состоянии, в котором осевая (z) и азимутальная (Θ) составляющие несущественны, из уравнения теплопроводности и определения кондуктивного теплообмена (закон Фурье) можно найти, что тепло уменьшается с увеличением радиуса:

$$q_{radial} = \frac{\lambda \Delta T}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) r}. \quad (9)$$

Общая теплопередача в цилиндре может быть рассчитана следующим образом:

$$Q = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{1}{h 2\pi r_o l} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi \lambda l}}. \quad (10)$$

В конечном итоге, коэффициент теплопередачи «U» определяется как сумма всех различных компонентов комплектации, на основе их геометрии и тепловых свойств:

$$\frac{1}{U} = \frac{r_o \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{\lambda_{tub}} + \frac{r_o \ln\left(\frac{r_{cl}}{r_o}\right)}{\lambda_{ann}} + \frac{r_o \ln\left(\frac{r_{co}}{r_{cl}}\right)}{\lambda_{cas}} + \frac{r_o \ln\left(\frac{r_l}{r_{co}}\right)}{\lambda_{cem}} + \frac{r_o}{r_{cl}(h_c + h_x)}. \quad (11)$$

Первые четыре слагаемых обозначают проводящие компоненты трубопровода, кольцевого пространства, обсадной трубы и цемента (коэффициент теплопроводности и радиусы). Коэффициенты h_c и h_x являются поправочными, учитывающими свободную конвекцию в кольцевом пространстве и излучение в кольцевом пространстве соответственно [9].

Для удобства расчетов выводят два других параметра на основе коэффициента теплопередачи U и длины L_T :

Коэффициент теплопотерь:

$$H_{LC} = U 2\pi d L_T. \quad (12)$$

Теплопроводность:

$$D_{wb} = U^2 2\pi d L_T w. \quad (13)$$

Параметры конструкции заканчивания и теплофизические свойства могут быть заданы по участкам на различных глубинах. Однако, если профиль температуры потока ограничен интервалами добычи, нет необходимости детализировать каждое изменение конструкции скважины выше этого участка.

Решение прямой начинается с нижнего пласта с тремя входными данными: минимальный дебит, максимальный дебит и интервал притока. Для каждого дебита выполняется моделирование притока и потока в скважине, распределение температуры в пласте и скважине. Расчетная температура в скважине для каждого дебита сравнивается с измерением DTS для этого пласта. Значение дебита, при котором разность измеряемой и расчетной температур по продуктивному интервалу наименьшая, считается окончательной величиной для этого пласта. Расчет профиля дебита выполняется последовательно для всех вышележащих продуктивных интервалов и для всех фаз.

Фазовый состав притекающего из пластов флюида можно предположить на основе аномалий температурного профиля (с учётом эффекта Джоуля – Томсона) [10]. Качественный анализ усредненных замеренных профилей позволяет сделать вывод о том, что прорыв газа наблюдается практически из всех пластов. Вода может прорываться только из верхнего пласта в силу близости контура краевой воды. Были просчитаны прямые задачи для следующих сценариев:

– сценарий 1: прорыв свободного газа по пласту XI-1. Вода в притоке (15 %) возможно вследствие подтягивания воды с ВНК;

– сценарий 2: основной приток флюида с высоким ГФ из пласта XIV-1;

– сценарий 3: отсутствие прорыва газа по пластам XIII-1, XIII-2, XIII-3 и XIV-1, в притоке нефть и попутный газ;

– сценарий 4: увеличение дебита из интервалов XIII-1, XIII-3 и XIV-1.

Пример расчетов процесса притока флюида с различными вариациями фазового состава проиллюстрирован на *рисунке 2*.

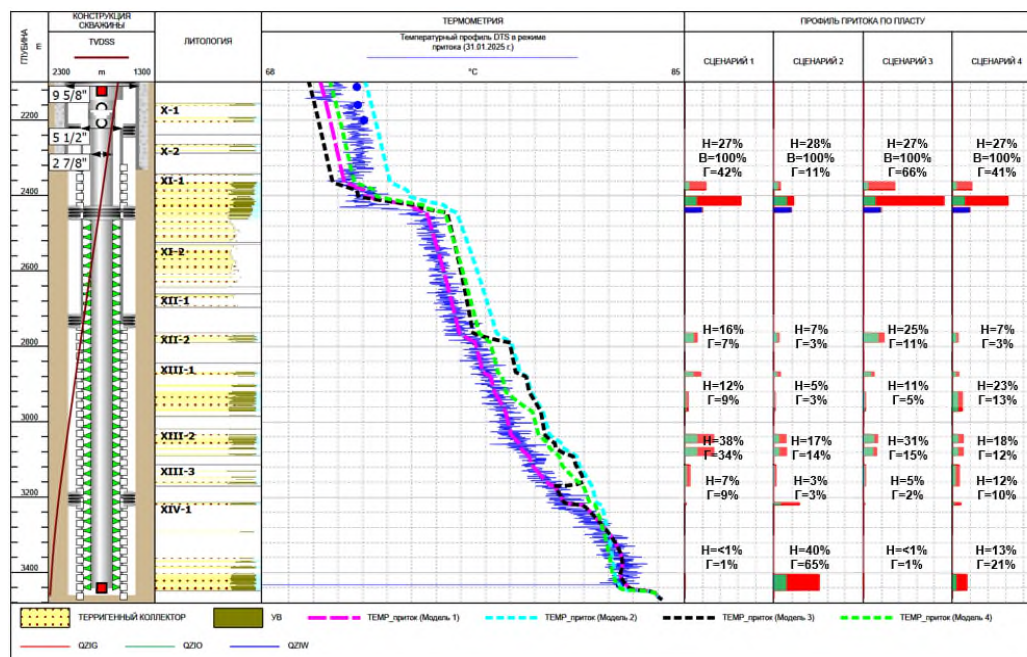


Рисунок 2. Результаты расчета температурного профиля при различных сценариях распределения дебита и фазового состава флюида по пластам

Решение обратной задачи заключается в определении невязки (суммарной разности замеренного и расчетного профилей) для каждого сценария. Наилучшую адаптацию расчетных и замеренных температурных профилей, а также дебитов по жидкости и газу показал сценарий 1. Максимальная невязка отмечена в сценарии 4, а сценарии 2 и 3 показали результаты, близкие к нему. Расчетные параметры для выбранного сценария сведены *таблице 1*.

Таблица 1 – Результаты решения обратной задачи по определению дебитов и фазового состава притока для модельной задачи

Индекс пласта	Нефть, ст. усл.		Газ общий, ст. усл.		Вода	
	м ³ /сут.	%	тыс. м ³ /сут.	%	м ³ /сут.	%
XI-1	192	27	55,0	42	121	100
XII-2	111	16	8,7	7	0	0
XIII-1	88	12	11,2	9	0	0
XIII-2	274	38	44,6	34	0	0
XIII-3	52	7	11,0	9	0	0
XIV-1	2	1	1,0	1	0	0
Итого:	719	100	131,4	100	121	100

Отличие алгоритма решения обратной задачи состоит в том, что специалист или эксперт выбирает расчетные решения прямой задачи на основе различной информации о пластовой системе и особенностях ее разработки. В этом состоит ее плюс, так как привлекается дополнительная информация. С другой стороны, выбор ограниченного набора расчетных сценариев выдает решение обратной задачи с непрограммируемой невязкой.

Традиционные методы решения обратных задач сводятся к методам типа градиентного спуска и получению решения с заданной точностью. С другой стороны, решение задач с несколькими варьируемыми параметрами может быть некорректным и приводить к «нефизичным» решениям.

Выводы

Разработанный алгоритм позволяет выполнять решение связанных задач по характеристике притока флюида из пластов в скважину и многофазного потока в скважине путем прямого и обратного моделирования.

Прямое моделирование включает в себя воспроизведение температурного профиля в скважине с учётом различных физических особенностей потока.

В качестве алгоритмов решения обратных задач рассматриваются следующие: традиционный метод типа градиентного спуска и с использованием экспертного опыта с составлением набора наиболее вероятных сценариев, где выбор составляется экспертом на основе различных данных и пласте, истории работы скважины и разработки месторождения.

Библиография

1. Гаязов М.С., Давлетшин Ф.Ф., Валиуллин Р.А. и др. Особенности теплового поля в горизонтальной скважине применительно к определению расхода жидкости методом активной термометрии // Нефтегазовое дело. 2023. № 21 (5). С. 6–18.
2. Nowak T.J. The Estimation Water Injection Profiles from Temperature Survey // Petroleum Transaction AIME. 1953. N 198. P. 203-212.
3. Ramey H.J. Wellbore Heat Transmission // Journal of Petroleum Technology. 1962. N 4. P. 427–435.
4. Hasan A.R., Kabir C.S., Wang X. A robust Steady-State Model for Flowing-Fluid Temperature in Complex Well // SPE 109765. Annual Technical Conference. Anaheim, 2007. P. 17–18.
5. Нигматулин Р.И. Механика сплошной среды. Кинематика. Динамика. Термодинамика. Статистическая динамика. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. 640 с.
6. Рубинштейн Л.И. Температурные поля в нефтяных пластах. М.: Недра, 1972. 276 с.
7. Арнольд Л.В., Михайловский Г.А., Селиверстов В.М. Техническая термодинамика и теплопередача. Т. 2. М.: Высшая школа. 1979. 446 с.
8. Brown G.B., Kennedy B., Meling T. Using Fiber-Optic Distributed Temperature Measurements to Provide Real-Time Reservoir Surveillance Data on Witch Farm Field Horizontal Extended-Reach Wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, 2000. P. 45–47.
9. Goiffon J. Applications of Fiber-Optic Real-Time Distributed Temperature Sensing in a Heavy-Oil-Production Environment // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Amsterdam: The Netherlands, 2006. P. 7–14.
10. Рыжов В.А., Лютоев П.А. Контроль пароциклической обработки пласта с помощью распределенной волоконно-оптической системы DAS и DTS в скважинах ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» // Сборник материалов 6-ой научно-практической конференции «Горизонтальные скважины – 2024». М., 2024. С. 281–284.
11. Hasan A.R., Kabir C.S. Fluid Flow and Heat Transfer in Wellbores // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas: SPE. Richardson, 2002. P. 31–36.
12. Brown G., Field D. Production Monitoring Through Openhole Gravel-Pack Completions Using Permanently Installed Fiber-Optic Distributed Temperature Systems in the BP-Operated Azeri Field in Azerbaijan // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, 2005. P. 5–8.
13. Costello C., Sordyl P., Hughes C. Permanent Distributed Temperature Sensing (DTS) Technology Applied in Mature Fields: A Forties Field Case Study // Proceedings of the SPE Intelligent Energy International. Utrecht: The Netherlands, 2012. P. 12–13.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 536.37: 678.744.388

Моделирование тепловых процессов в биоматериалах с использованием метода Монте-Карло

Борис Иналович Кунижев¹, Мариям Тахировна Хаджиева², Азамат Асланович Жамбеков³, Зарета Хизировна Гайтукиева⁴, Жамал Жабраилович Жабоев⁵

^{1,2,3,5}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

⁴Ингушский государственный университет, Магас, Россия

¹b.kunizhev51@mail.ru

²khadzhiieva2000@mail.ru

³ajambekov_4@mail.ru

⁴zareta.amatxanova@mail.ru

⁵akylman_07@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию взаимодействия лазерного излучения с полимерами (на примере полиметилметакрилата, с помощью метода Монте-Карло. Рассмотрены ключевые процессы взаимодействия: поглощение, рассеяние света и теплопередача. Приведены принципы построения численных моделей для описания распространения света в многослойных средах, что важно для приложений в медицинских процедурах, лазерной литографии и обработке поверхностей.

Ключевые слова: полиметилметакрилат, лазерное излучение, абсорбция света, рассеяние света, теплопередача, многослойные среды, метод Монте-Карло

Для цитирования: Кунижев Б. И., Хаджиева М. Т., Жамбеков А. А., Гайтукиева З. Х., Жабоев Ж. Ж. Моделирование тепловых процессов в биоматериалах с использованием метода Монте-Карло // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 1. С. 21–24.

PHYSICS

Original article

Modeling of thermal processes in biomaterials using the Monte Carlo method

Boris I. Kunizhev¹, Mariam T. Khadzhiieva², Azamat A. Zhabekov³, Zareta K. Gaitukieva⁴, Zhamal Z. Zhaboev⁵

^{1,2,3,5} Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

⁴ Ingush State University, Magas, Russia

¹ b.kunizhev51@mail.ru

² khadzhiieva2000@mail.ru

³ ajambekov_4@mail.ru

⁴ zareta.amatxanova@mail.ru

⁵ akylman_07@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the study of the interaction of laser radiation with polymers such as polymethylmethacrylate using the Monte Carlo method. The key physical processes that occur during this interaction, including absorption, light scattering, and heat transfer, are considered. The principles of constructing numerical models for describing light propagation in multilayer media are presented, which is important for applications in medical procedures, laser lithography, and surface treatment.

Keywords: polymethylmethacrylate, laser radiation, light absorption, light scattering, heat transfer, multi-layer media, Monte Carlo method

For citation: Kunizhev B.I., Khadzhiyeva M.T., Zhambekov A.A., Gaitukieva Z.K., Zhaboev Z.Z. Modeling of thermal processes in biomaterials using the Monte Carlo method // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):21–24.

Введение

Метод Монте-Карло представляет собой статистический подход к решению сложных задач, основанный на использовании случайных чисел для моделирования процессов. Он был разработан в середине XX века в рамках Манхэттенского проекта для решения задач, связанных с ядерной физикой, что подчеркивает его значимость для научных исследований. В контексте теплопередачи метод Монте-Карло позволяет моделировать сложные процессы, такие как рассеяние и поглощение тепловой энергии, с учетом случайных факторов, что делает его незаменимым инструментом в исследованиях.

Полимеры, такие как полиметилметакрилат (ПММА), востребованы в различных областях науки и техники благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. ПММА отличается высокой прозрачностью и биосовместимостью. Взаимодействие лазерного излучения с полимерами включает несколько физических процессов, таких как поглощение, рассеяние света и теплопередача. Эти процессы зависят от свойств материала, длины волны лазерного излучения и его интенсивности. В результате лазерного воздействия в полимерах могут происходить структурные изменения, которые находят применение в таких областях, как лазерная литография и обработка поверхностей. В частности, в системе применяются два лазера, работающие в различных спектральных диапазонах и в различных режимах [1–3].

Используя концепцию многократного рассеяния в плотно-упакованной среде и опираясь на уравнения теории переноса, с помощью численного моделирования методом Монте-Карло возможно предсказать характер распределения света $I(x, z)$, где x – поперечная координата. Известные алгоритмы позволяют учесть многослойность биоткани, конечный размер падающего пучка, отражение света от границ раздела слоев.

Методика

Для построения модели расчета распространения лазерного излучения и нагрева биоткани (многослойной структуры с переменными оптическими и теплофизическими параметрами), принимается направление распространения лазерного луча перпендикулярно поверхности среды.

Распределение оптического излучения в биоткани рассчитывается с помощью модели, реализующей метод Монте-Карло и позволяющей учесть многослойность среды, конечные размеры падающего пучка, отражение и преломление света на границах между слоями и на внешней границе среды.

Каждый i -й слой биоткани характеризуется набором параметров: коэффициентами поглощения и рассеяния, толщиной образца и показателем преломления среды.

Полная освещенность в точке с координатами (x, y, z) получается путем интегрирования функции Грина, определяющей распределение полной освещенности в среде. При этом предполагается, что падающий пучок имеет радиальную симметрию.

При непосредственном математическом моделировании движения пакетов фотонов суммарная толщина выбирается так, чтобы часть излучения, попадающая за пределы изучаемого цилиндра, была пренебрежимо мала. Область разбивается на ячейки, а каждой ячейке сопоставляется значение полной освещенности.

При моделировании каждому пакету фотонов в точке входа в биоматериал присваивается исходный статистический вес. Направление движения пакета определяется углами θ, φ (θ отсчитывается от положительного направления оси x в плоскости xu , φ – от положительного направления оси z) (рисунок).

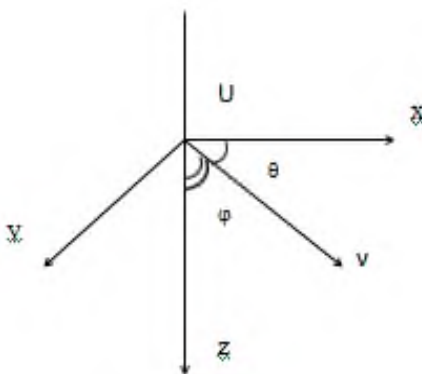


Рисунок – Схема направлений движения пакета фотонов

В некоторой точке объема происходит элементарный акт поглощения, т. е. определенная доля энергии пакета фотонов в этой точке поглощается. В этой же точке происходит акт рассеяния, т. е. пакету фотонов присваивается новое направления движения. Когда оно определено, вычисляется длина пробега пакета на данном шаге моделирования. Если точка, куда должен попасть пакет фотонов, находится в том же слое, что и исходная, то пакет перемещается в эту точку. В противном случае по формулам Френеля определяется вероятность отражения пакета от границы раздела слоев и события, состоящего в отражении пакета фотонов.

Обсуждение результатов

Применение метода Монте-Карло позволяет с высокой точностью моделировать тепловые процессы в полимерах под воздействием лазерного излучения. Данный метод учитывает влияние случайных процессов – рассеяния и поглощения света в неоднородной структуре полимеров. Используя метод Монте-Карло, можно моделировать распределение температуры внутри полимера, что особенно важно для понимания локальных тепловых эффектов. Миллионы итераций на современных вычислительных мощностях обеспечивает высокую точность и надежность получаемых результатов. Применение метода Монте-Карло в данном контексте открывает возможность для детального анализа тепловых процессов, что критически важно для разработки новых технологий обработки полимеров.

Моделирование тепловых процессов в полимерах методом Монте-Карло дает практически значимые результаты. Анализ температурных распределений помогает выявить критические зоны, где происходят наибольшие изменения структуры материала. Это особенно актуально для лазерной обработки поверхностей, где точность и контроль температуры играют ключевую роль. Важно отметить, что в [2] рассмотрены основные принципы построения математических моделей для расчета распределения интенсивности излучения и температуры в тканях кожи. Моделирование также позволяет оптимизировать параметры лазерного воздействия, включая интенсивность и длительность импульса, для достижения желаемых эффектов. Таким образом, метод Монте-Карло становится незаменимым инструментом для изучения и разработки технологий, связанных с лазерной обработкой полимеров.

Для проведения сравнительного анализа между результатами моделирования методом Монте-Карло и экспериментальными данными была разработана методология, включающая несколько этапов. На первом этапе были определены параметры лазерного излучения, такие как длина волны, мощность и длительность импульса, которые использовались как в моделировании, так и в эксперименте. На втором этапе для моделирования тепловых процессов в биотканях и полиметилметакрилате применялся метод Монте-Карло, который позволял учитывать случайное рассеяние света и теплопередачу в среде. Экспериментальная часть включала измерение температурных изменений с использованием тепловизионной камеры и термопар, размещённых в ключевых точках образцов. Такая методология позволила обеспечить сопоставимость данных и минимизировать погрешности.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных показало высокую степень совпадения температурных распределений в исследуемых материалах. Для биотканей характерно сложное распределение температуры, обусловленное их неоднородной структурой и спектром поглощения лазерного излучения. Что касается полиметилметакрилата, обладающего коэффициентом теплопроводности около 0,2 Вт/(мЖ), результаты моделирования продемонстрировали локальные нагревы в зонах рассеяния света, что также согласуется с экспериментальными данными. Это подтверждает не только корректность используемой модели, но и её способность точно воспроизводить тепловые процессы [3].

Заключение

Точность метода Монте-Карло была проанализирована на основе отклонений моделируемых температур от экспериментальных данных. Среднеквадратическое отклонение составило менее 5 % для большинства точек измерений, что указывает на высокую точность метода. Существенным аспектом является способность этого подхода учитывать случайные процессы, такие как рассеяние света и поглощение в неоднородных средах, что делает его особенно эффективным для моделирования сложных тепловых процессов. Авторы [4] отмечают, что метод Монте-Карло активно используется для моделирования прохождения фотонов через биоткань и расчета распределения поглощенных фотонов в среде. Таким образом, метод демонстрирует высокую надежность и применимость для исследования взаимодействия лазерного излучения с различными материалами.

Библиография

1. Ринкевичюс Б.С., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Исследование теплофизических процессов в жидкости методом лазерной рефрактографии // Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. Т. 63, № 1. С. 12–20.
2. Пушкарева А.Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани: учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. 103 с.
3. Антонов Е.Н., Баграташвили В.Н., Попов В.К., Попов, А.В., Бочкова С.А., Кротова Л.И. Разработка метода поверхностно селективного лазерного спекания для формирования матриц тканеинженерных конструкций // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия Медицина. Фармация. 2023. № 1. С. 30–32.
4. Абдурахманова, Р.А., Магомедов М.А., Магомедова Л.К. Моделирование лазерного нагрева биологических тканей // Научные труды ДГУ. 2017. № 1. С. 297–298.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 538.958

**Характеристики модифицированного сцинтилляционного детектора
на основе большого кристалла NaI(Tl) для измерения активности радона в воздухе**

**Мартин Батарбиевич Масаев¹, Тимур Мухамедович Байсиев², Аслан-Гирей Мартинович Масаев³,
Альберт Мусаевич Гангапшев⁴, Алексей Петрович Савинцев⁵**

^{1,2,3,4,5} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия;

⁴ Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

¹ masmartin@mail.ru

² konnerdon@gmail.com

³ aslangeri.masaev.00@mail.ru

⁴ gangapsh@list.ru

⁵ savinal@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены характеристики модифицированного сцинтилляционного детектора на основе большого кристалла NaI(Tl) с колодцем для количественного метода определения концентрации радона в воздухе по гамма-спектрам дочерних продуктов свинца и висмута. Предлагается методика улучшения энергетического разрешения детектора за счет применения одного ФЭУ-173 с установкой светоотражающего кольца на окно кристалла NaI(Tl) вместо трех ФЭУ-110, что позволяет увеличить эффективность светосбора, повышая в конечном итоге точность количественного метода.

Ключевые слова: радон, дочерние продукты распада, сцинтилляционный детектор, светоотражающее кольцо, ФЭУ-173, светосбор, энергетическое разрешение, гамма-спектр

Для цитирования: Масаев М. Б., Байсиев Т. М., Масаев А. М., Гангапшев А. М., Савинцев А. П. Характеристики модифицированного сцинтилляционного детектора на основе большого кристалла NaI(Tl) для измерения активности радона в воздухе // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 1. С. 25–29.

PHYSICS

Original article

Scintillation detector based on a large NaI(Tl) crystal for measurement characteristics of a modified ring the activity of radon in air

Martin B. Mashaev¹, Timur M. Baysiev², Aslan-Girey M. Mashaev³, Albert M. Gangapshiev⁴, Alexei P. Savintsev⁵

^{1,2,3,4,5} Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia;

⁴ Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ masmartin@mail.ru

⁴ gangapsh@list.ru

⁵ savinal@mail.ru

² konnerdon@gmail.com

³ aslangeri.mashaev.00@mail.ru

Abstract. The characteristics of a modified scintillation detector based on a large NaI(Tl) crystal with a well for a quantitative method of determining the concentration of radon in the air by measuring the gamma spectra of daughter products lead and bismuth are considered in the paper. A technique is proposed to improve the energy resolution of the detector by using one FEU-173 with the installed reflective ring on the window of the NaI(Tl) crystal instead of using of the three FEU-110. Such modification makes it possible to increase the efficiency of light collection, ultimately increasing the accuracy of the quantitative method.

Keywords: radon, daughter decay products, scintillation detector, reflective ring, FEU-173, light collection, energy resolution, gamma spectrum

For citation: Masaev M. B., Baysiev T. M., Masaev A. M., Gangapshev A. M., Savintsev A. P. Characteristics of a modified scintillation detector based on a large NaI(Tl) crystal for measuring the activity of radon in air // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):26–29.

Введение

Природный радон (^{222}Rn) представляет собой бесцветный, не имеющий запаха инертный газ. Он образуется в процессе радиоактивного распада природных радиоактивных элементов, которые содержатся в небольших количествах в горных породах, и постоянно поступает из земной коры в водную и воздушную среду [1–6].

Контроль за поступлением и концентрацией радона-222 и его дочерних продуктов распада (ДПР) в атмосферном воздухе имеет большое значение для решения важных задач метеорологии, сельского хозяйства, экологии и т. д. Так, в метеорологии радон-222 используется как маркер динамики воздушных масс и облачных систем.

Применяемые в настоящее время методы определения содержания радона-222 в воздухе с помощью электроосаждения его α -активных ДПР на поверхностно-барьерные проводниковые детекторы имеют ряд неустраняемых недостатков, связанных с малым измеряемым объемом (что снижает точность), необходимостью тщательной осушки и очистки исследуемого воздуха от аэрозолей.

Указанные недостатки можно преодолеть с помощью предлагаемого в данной работе другого количественного метода определения содержания концентрации радона по γ -линиям дочерних продуктов ^{214}Pb , ^{214}Bi , собранных на аэрозольном фильтре.

Суть предлагаемого метода заключается в том, что гамма-активные ДПР ^{214}Pb , ^{214}Bi , являясь атомами металлов, с высокой вероятностью захватываются аэрозолями воздуха, концентрация которых (в городском воздухе до 10^5 см^{-3}) достаточна для этого. При этом γ -спектр ^{214}Pb и ^{214}Bi измеряется с помощью модифицированного сцинтилляционного детектора на основе большого кристалла NaI(Tl) с колодцем.

Таким образом, наличие самих аэрозолей и влажность, влияющая на размер улавливаемых фильтром аэрозолей, только увеличивают точность метода.

Можно справедливо утверждать, что данный метод дополняет существующие методы определения содержания радона-222.

Цель исследования: повышение точности количественного метода определения содержания радона в воздухе по гамма линиям ДПР ^{214}Pb , ^{214}Bi путем улучшения энергетического разрешения детектора из кристалла NaI(Tl) большого размера за счет применения нового ФЭУ-173 со светоотражающим кольцом, что позволяет значительно увеличить эффективность светосбора.

Задача работы: модификация системы светосбора сцинтилляционного детектора из большого кристалла NaI(Tl).

В целях улучшения характеристик сцинтилляционного спектрометра БДЭГ-12 была выполнена модификация системы светосбора путем замены трех ФЭУ-110 на один ФЭУ-173 (рисунок 1).

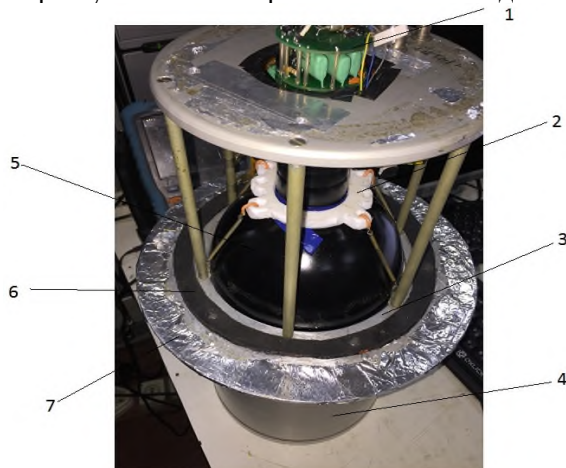


Рисунок 1 – Модификация большого NaI (Tl) детектора с установкой ФЭУ-173, делителя с предусилителем и встроенным высоковольтным блоком и светоотражающего кольца: 1 – делитель для ФЭУ 173, включающий предусилитель и высоковольтный блок; 2 – система фиксации ФЭУ-173 на окне большого NaI кристалла; 3 – светоотражающее кольцо; 4 – большой кристалл NaI(Tl) $20 \times 20 \text{ см}^2$ с колодцем в защитном кожухе; 5 – ФЭУ-173; 6 – светонепроницаемая уплотняющая прокладка для верхнего кожуха детектора; 7 – металлический конструктив для установки пассивной защиты из свинца

Мы ожидаем улучшение разрешения по энергии с 20 до 9 %, поскольку ФЭУ-173 имеет более высокую спектральную (410 нм), анодную, световую чувствительность $5 \cdot 10^{-2} \text{ А/Вт}$, 10 А/Лм , 10^{-4} А/Лм ,

соответственно. В целях оптимизации обработки аналогового сигнала, который раньше формировался от делителей трех ФЭУ-110, подававших на каждый фотокатод высокое напряжение порядка 1 кВ, на новом ФЭУ-173 использован более современный блок питания усиления БПУ-173 (рисунок 2), позволяющий дополнительно ввести предварительный каскад усиления первичного сигнала и формировать непосредственно нужное напряжение питания ФЭУ-173 (рисунок 3).

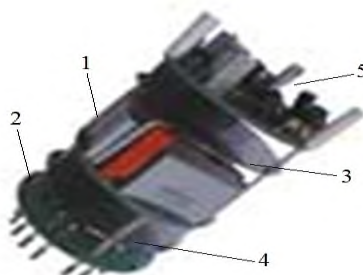


Рисунок 2 – Состав БПУ-173: 1 – рецзионный регулируемый высоковольтный блок питания (ПРВБП); 2 – делитель напряжения для ФЭУ; 3 – усилитель аналогового сигнала; 4 – интегральный дискриминатор; 5 – формирователь импульса логического сигнала



Рисунок 3 – Общий вид ФЭУ-173

С целью исключения потерь полезных событий при светосборе, ввиду разного диаметра окна (200 мм) большого кристалла NaI(Tl) и окна ФЭУ-173 диаметром 170 мм, было выполнено сопряжение окон с установкой кольца из светоотражающего материала. Внешний диаметр кольца составляет 20 см, а внутренний – 17 см.

Выполнение измерений и обсуждение результатов

Калибровочный спектр, набранный на большом кристалле NaI(Tl), с оснасткой из трех ФЭУ-110 от источника ^{226}Ra представлен на *рисунке 4*. На спектре видны γ -линии: ^{214}Pb – 0,352 МэВ (1); а также ^{214}Bi – 0,609 МэВ (2) и 1,764 МэВ (3). Линии же ^{214}Bi : 1,12-1,238 МэВ, 1,4 МэВ и 2,12 МэВ не проявились из-за невысокого разрешения по энергии. Величину разрешения по ширине пиков 609 и 1764 кэВ на полувысоте находим по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{K_0} 100 \%,$$

где ΔE – ширина пика на полувысоте, K_0 – центр тяжести пика.

В анализируемом спектре пик 1 в ~70 канале соответствует энергии 0,352 МэВ, в пике 2 (609 кэВ) разрешение ε составляет 19 %, а в пике 3 (1768 кэВ) разрешение составило 20 %, соответственно. Очевидно, разрешение ФЭУ-110 в МэВ-ной области, где вклад фона минимален, не позволяет проводить точный количественный анализ.

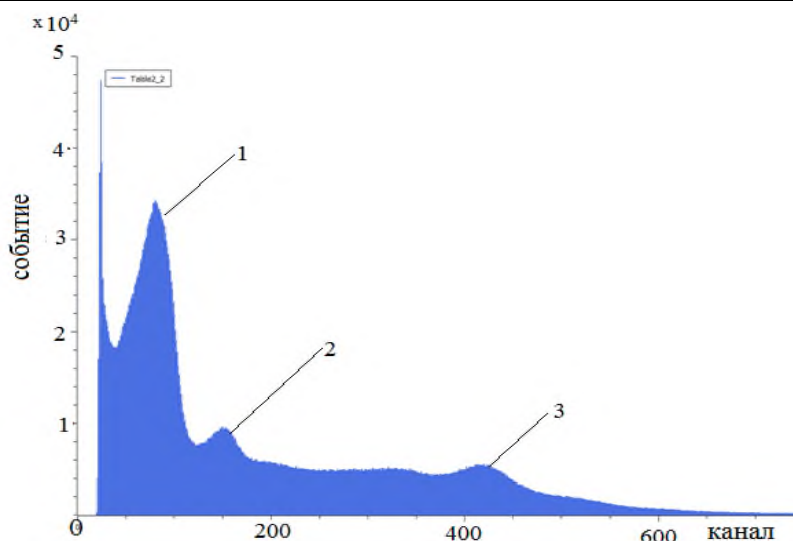


Рисунок 4 – Гамма спектр источника ^{226}Ra . 5 минутная экспозиция набрана кристалле NaI с ФЭУ-110, указаны гамма-линии дочерних продуктов ^{222}Rn : ^{214}Pb – 0,352 МэВ (1); ^{214}Bi : – 0,609 МэВ (2), 1,764 МэВ (3)

На *рисунке 5* представлен новый гамма спектр источника ^{226}Ra . Пятиминутная экспозиция набрана на модифицированном сцинтилляционном детекторе с ФЭУ-173, с модернизированным делителем и светоотражающим кольцом. Результаты оценки энергетического разрешения модифицированного детектора по ширине пиков 609 и 1764 КэВ представлены на *рисунке 5*.

В результате улучшения разрешения по энергии проявились линии ^{214}Bi : 1,12, 1,138, 1,4 МэВ, а также слабо, но проявилась линия 2,12 МэВ.

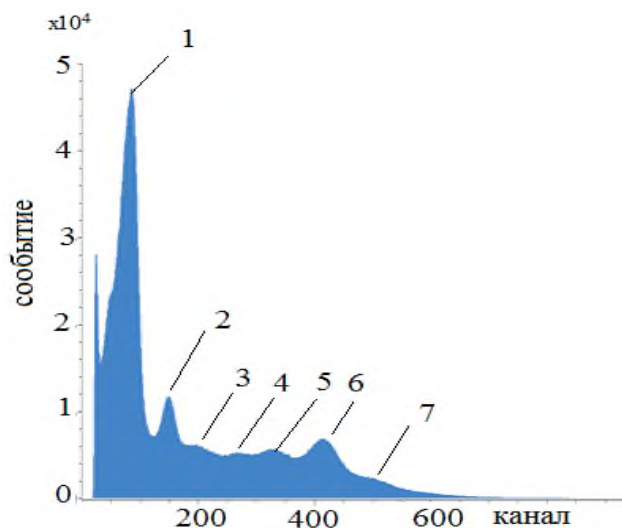


Рисунок 5 – Гамма-спектр, набранный на большом кристалле NaI(Tl) с модифицированным светосбором. Стрелками указаны гамма-линии дочерних продуктов ^{222}Rn . ^{214}Pb : 1 – 0,352 МэВ; ^{214}Bi : 2 – 0,609 МэВ, 3 – 1,12 МэВ, 4 – 1,238 МэВ, 5 – 1,4 МэВ, 6 – 1,764 МэВ, 7 – 2,12 МэВ

По результатам анализа спектра определено энергетическое разрешение детектора: для линии 609 кэВ разрешение составляет 12 %, и для линии 1764 кэВ разрешение составило также 12 %.

Выводы

На большом кристалле NaI(Tl) выполнена замена трех ФЭУ-110 на ФЭУ 173. Для устранения потерь в процессе светосбора на ФЭУ-173 на окне сцинтиблока NaI(Tl) было установлено светоотражающее кольцо.

Представлен гамма-спектр ДПР радона-222 от источника радия-226, набранный на большом кристалле NaI с тремя ФЭУ-110 до модификации светосбора. Разрешение по энергии линиям ^{214}Bi : 0,609, 1,4, 1,764 МэВ составляет 18–20 %.

Представлен гамма-спектр ДПР радона-222 от источника радия-226, набранный на большом кристалле NaI с ФЭУ-173 после модификации. Обозначены основные гамма линии ДПР ^{214}Pb , ^{214}Bi : 0,352, 0,609, 1,12, 1,4, 1,764 МэВ.

Сравнительный анализ показал, что разрешение по энергии в самом ярком (47 %) пике полного поглощения 0,609 МэВ значительно выше и соответствует ~12 %.

Библиография

1. Уткин В.И., Юрков. А.К. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения // Доклады РАН. 1998. Т. 358, № 5. С. 675–680.
2. Pomansky A.A., Severny S.A., Trifonov E.P. Radium and radon content in different materials // Atomnaya Energiya. 1969. V. 27. P. 36–38.
3. Бекман И.Н., Хасков М.А., Пасека В.И., Панаркина Л. Е., Рязанцев Г.Б. Вариации радиационного поля в северной части Азовского моря // Вестник МГУ, Сер. Химия. 2003. Т. 44, № 2. С. 140–148.
4. Tsvetkova T., Nevisky I., Nevisky V. Measurements of soil radon in South Russia for seismological application: some results // Radiation Measurements. 2012. V. 47, N 4. P. 281–291.
5. Nevisky I., Tsvetkova T., Neviskyaya E. Measurements of radon in ground waters of the Western Caucasus for seismological application // Journal of Environmental Radioactivity. 2015. V. 149. P. 19–35.
6. Гаврилюк Ю.М., Гангапшев А.М., Гежаев А.М., Казалов В.В., Кузьминов В.В., Хоконов А.Х., Этезов Р.А. Вариации содержания ^{222}Rn в наземных и подземных условиях // Физика Земли. 2024. № 6. С. 80–92.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 544.723.2

**Ориентационная зависимость параметров двойного
электрического слоя поверхности адсорбционной системы W-Cs**

**Аслан-Гирей Мартинович Масаев¹, Наталия Сергеевна Реуцкая², Заур Анатольевич Коков³,
Хамидби Хажисмелович Калажоков⁴, Павел Константинович Коротков⁵, Светлана Наниевна
Ахкубекова⁶**

^{1,2,3,4,5} Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова, Нальчик, Россия

⁶ Кабардино-Балкарский аграрный университет им. В.М. Кокова, Нальчик, Россия

¹ aslangeri.masaev.00@mail.ru

² _natalie@mail.ru

³ zak@kbsu.ru

⁴ khh49@mail.ru

⁵ pkorotkov1984@mail.ru

⁶ aminka07-07@mail.ru

Аннотация. С использованием уравнения Гельмгольца проведен расчет ориентационной зависимости дипольных моментов атомов цезия, адсорбированных на монокристаллические поверхности вольфрама. Оказалось, что величина определяемого дипольного момента зависит от места, занимаемого адатомом на поверхности кристалла.

Ключевые слова: адсорбция, работа выхода электрона, ориентационная зависимость, дипольный момент адатомов

Для цитирования: Масаев А.М., Реуцкая Н.С., Коков З.А., Калажоков Х.Х., Коротков П.К., Ахкубекова С.Н. Ориентационная зависимость параметров двойного электрического слоя поверхности адсорбционной системы W-Cs // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 1. С. 30–33.

PHYSICS

Original article

**Oriental dependence of the parameters of the double
electric layer of the surface of the adsorption system W-Cs**

**Aslan-Girey M. Masayev¹, Nataliya S. Reutskaya², Zaur A. Kokov³, Khamidbi Kh. Kalazhokov⁴,
Pavel K. Korotkov⁵, Svetlana N. Akhkubekova⁶**

^{1,2,3,4,5} Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

⁶ Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Nalchik, Russia

¹ aslangeri.masaev.00@mail.ru

² _natalie@mail.ru

³ zak@kbsu.ru

⁴ khh49@mail.ru

⁵ pkorotkov1984@mail.ru

⁶ aminka07-07@mail.ru

Abstract. Using the Helmholtz equation, the orientation dependence of the dipole moments of cesium atoms adsorbed on single-crystal tungsten surfaces was calculated. It turned out that the value of the determined dipole moment depends on the position of the adatom on the crystal surface.

Keywords: adsorption, electron work function, orientation dependence, and dipole moment of adatoms

For citation: Masaev A.M., Reutskaya N.S., Kokov Z.A., Kalazhokov Kh.Kh., Korotkov P.K., Akhkubekova S.N. Orientational dependence of the parameters of the double electric layer of the surface of the adsorption system W-Cs // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):30–33.

Введение

В литературе представлено большое количество экспериментальных данных по изучению адсорбции чужеродных атомов на однородные поверхности металлов [1–4]. Одним из способов изучения таких систем, как *металлическая поверхность – адсорбированный атом (ада́том)*, является измерение работы выхода электрона (РВЭ) [1–3, 5]. Однако при определении параметров двойного электрического слоя (ДЭС) – дипольного момента адатома (m_0), длины плеча диполя (d_0) и др. – недостаточное внимание уделяется их зависимости от ориентации кристаллической плоскости. Нет четкости также при определении угла наклона касательной к кривой изотермы РВЭ [$\varphi(N)$] при малых заполнениях поверхности металла (при степени заполнения $q \ll 1$) [1, 2, 4]. Аппроксимация кривой $\varphi(N)$ в начальной области ее заполнения линейной функцией также может оказаться не всегда достаточно точной. Тем не менее, за неимением лучшего, исследователи пользуются таким приближением [1, 2]. Ниже приведены результаты наших расчетов параметров ДЭС m_0 и d_0 в зависимости от ориентации кристаллической плоскости, полученные с использованием экспериментальных данных по РВЭ широко известной системы W-Cs [1, 2].

1. Методика определения параметров m_0 и d_0 ДЭС поверхности адсорбционной системы $(hkl)W-Cs$

Для определения величины дипольного момента m_0 адатома воспользуемся известным уравнением Гельмгольца [2, 4], описывающим изменение РВЭ однородной поверхности металлического кристалла в зависимости от адсорбции чужеродных атомов [2, 4–6]

$$j(N) = j_0 - 4\pi m_0 N, \quad (1)$$

где $\varphi(N)$ – РВЭ поверхности металла с адсорбатом концентрации N , φ_0 – РВЭ поверхности чистого металла, m_0 – дипольный момент одиночного адатома.

Формула (1) одинаково хорошо описывает начальный этап заполнения поверхности как для систем *жидкая поверхность – чужеродные адатомы* [7], так и для систем *твердая однородная поверхность–чужеродные адатомы* [1, 2, 4].

Для систем *монокристаллическая поверхность–чужеродные адатомы* уравнение (1) перепишем в виде [6, 7]

$$j(q) = j_0 - 4\pi m_0 N_{0s} q, \quad (2)$$

где $q = N/N_{0s}$ – степень заполнения поверхности металла адатомами, N_{0s} – концентрация адсорбционных мест поверхности металла.

Ниже рассмотрим расчеты параметров двойного электрического слоя m_0 и d_0 адсорбционной системы монокристаллическая поверхность вольфрама– атомы цезия $(hkl)W-Cs$ [1, 2].

2. Результаты расчетов параметров m_0 и d_0 ДЭС системы $(hkl)W-Cs$

В качестве примера рассмотрим изменения РВЭ однородных граней вольфрама $(hkl)W$ в зависимости от адсорбции атомов цезия [1, 2].

Результаты экспериментальных измерений РВЭ методом контактной разности потенциалов для четырех граней вольфрама: (111), (110), (100) и (112) при адсорбции атомов цезия по данным работ [1, 2] представлены на *рисунке 1*.

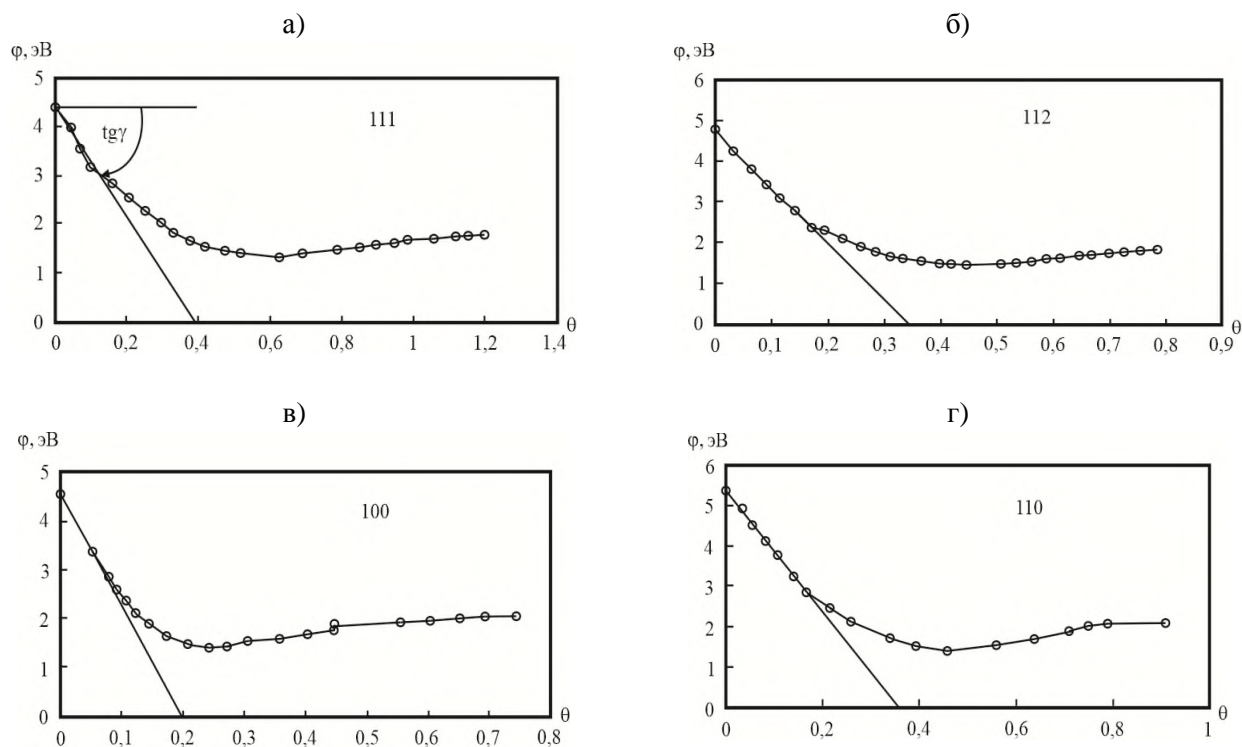


Рисунок 1 – Изменения РВЭ различных граней вольфрама (а-г) в зависимости от степени заполнения поверхности атомами цезия (q)

Как видно из *рисунка 1*, РВЭ поверхности кристалла при адсорбции цезия изменяется сложным образом. Начальные участки кривых *а* и *в* – явно нелинейные функции, а начальные участки кривых *б* и *г* представляют собой приблизительно линейные функции. Тем не менее, при расчетах параметров ДЭС и особенно при определении $\Delta(\Delta\varphi(q))/\Delta q$ часто допускают линейную аппроксимацию начального участка изотермы РВЭ [1, 2, 4-7]. Поэтому для начальных участков кривых изотерм РВЭ мы тоже будем использовать линейную аппроксимацию кривых РВЭ.

Для удобства и наглядности перепишем уравнение (2) в виде

$$Dj(q) = 4\pi m_0 N_{0s} q, \quad (3)$$

где $\Delta\varphi(q) = \varphi_0 - \varphi(q)$ – изменение РВЭ вольфрама при адсорбции цезия.

Анализ полученных кривых позволил графически определить (*рисунк 1, а-г*) наклоны изменения РВЭ от степени покрытия $q = N/N_{0s}$, соответствующие началам ($q \approx 0$) кривых изотерм (РВЭ) (*рисунк 1*). Воспользовавшись выражением (3), найдем угловой коэффициент начального участка кривой $\varphi(q)$ приближенно:

$$\frac{d(Dj(q))}{dq} \gg \frac{D(Dj(q))}{Dq} = 4\pi m_0 N_{0s}. \quad (4)$$

Заметим, что угловой коэффициент $\Delta(\Delta\varphi(q))/\Delta q$ вычисляется из *рисунка 1* графическим способом по указанной схеме – вручную.

Из *рисунка 1* видно, что выражение (4) справедливо для начального участка кривой $\varphi(q)$. То есть приблизительно для системы W-Cs до значений параметра $q = 0,3 - 0,4$.

Для расчетов m_0 нами использовано выражение (4), которое принимает следующий вид в системе СИ:

$$m_0 = \frac{D(Dj(q))}{Dq} \frac{e_0}{N_{0s}}, \quad (5)$$

где $e_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Ниже в таблице приведены, найденные нами из *рисунка 1* значения $\Delta(\Delta\varphi(q))/\Delta q$ а также вычисленные значения N_{0s} , m_0 -дипольные моменты адатомов и d_0 – длины плеч диполей.

Результаты расчетов m_0 и d_0 в зависимости от типа грани металла приведены в *таблице 1*.

Таблица 1 – Входные данные [1, 2, 8] и вычисленные параметры ДЭС $m\theta$ и d_0 в зависимости от грани W-Cs

(hkl)	$N_{os},$ 10^{18} ат/м ²	$\Delta(\Delta\varphi(q))/\Delta q,$ эВ	$m\theta,$ 10^{-30} КлЖ	$m\theta,$ Д (Дебай)	плечо дип. момента. $d_0,$ Å
(111)	8,5 (5,7*)	11,0	11,6(17,16*)	5,30(5,14*)	0,73(1,1*)
(112)	9,5	14,12	13,21	3,96	0,83
(100)	10,0	23,9	21,29	6,37	1,33
(110)	14,2	15,4	9,73	2,92	1,82

*по литературным данным.

Сравнение полученных нами результатов $m\theta$ и d_0 с данными других авторов [по [9] $d_0=1,57$ Å; по [1, 2] $m\theta = 5,3$ Д для грани (111)] показывает, что способ измерения РВЭ позволяет получить вполне реальные результаты $m\theta$ и d_0 в зависимости от места занимаемого адатомом на поверхности кристалла. С другой стороны, интересен следующий факт: полная адсорбционная емкость поверхности грани (111) W: $N_{os}(111) = 8,5 \times 10^{18}$ ат/м² больше адсорбционной емкости $N_{os}(111) = 5,7 \times 10^{18}$ ат/м² этой же поверхности, обусловленной потенциальными «ямами», «бороздками», которыми богата последняя [1].

Как видно из данных первой строчки таблицы 1, для грани (111) W расчет параметров $m\theta$ и d_0 , дает лучшие результаты по $m\theta$, почти совпадающие с данным [1] (5,3 и 5,14 Д). Сравнение наших результатов для четырех граней вольфрама (таблица 1) подтверждает вывод работы [1]: при заполнении «ямок» и «бороздок» значения d_0 для таких поверхностей оказываются меньше, чем для плотноупакованных граней (100) и (110) W.

Заключение

Отработана методика расчетов $m\theta$ и d_0 адсорбционных систем «подложка-адатом» в области малых взаимодействий образуемых дипольных моментов. Оказалось, что методика, используемая для расчетов параметров поверхности $m\theta$ и d_0 , позволяет достоверно выявить ориентационную зависимость определяемых параметров поверхности кристалла, а также дает более ясное представление о строении поверхностного слоя адсорбционной системы. Различные значения полученных результатов $m\theta$ и d_0 связаны с местами и рельефом поверхности металла. Так, если адатом занимает положение над атомами самого первого слоя [грани (100) и (110)], значения d_0 больше по сравнению с d_0 граней (112) и (111), когда адатом занимает углубления типа «ямок» или «бороздок» в поверхностной решетке [1]. Сравнение полученных в настоящей работе значений $m\theta$ и d_0 с литературными данными других авторов исследователей показывает вполне удовлетворительное их согласие. Незначительные расхождения наших данных с результатами других [1, 9–11], по-видимому, связаны с аппроксимацией начального участка кривой $\varphi(x)$ линейной функцией.

Библиография

1. Медведев В.К., Якивчук А.И. Структура и электронно-адсорбционные свойства пленок цезия на грани (111) монокристалла вольфрама // ФТТ. 1975. Т. 17. С. 14–22.
2. Большов Л.А., Напартович А.П., Наумовец А.Г., Федорус А.Г. Субмонослойные пленки на поверхности металлов // УФН. 1977. Т. 122, № 1. С. 125–158.
3. Давыдов С.Ю., Носков И.В. К расчету изменения работы выхода при адсорбции атомов цезия на поверхности (110) TiO₂ // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27, № 20. С. 1–6.
4. Робертс М., Макки Ч. Химия поверхности раздела металл-газ. М.: Мир, 1981. 540 с.
5. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.Н. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966. 546 с.
6. Вудраф Д. Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989. 564 с.
7. Kalazhokov Z.Kh., Kalazhokov Kh.Kh. Surface tension of pure aluminium melt // Technical Physics. 2003. V. 48, N 2. P. 272–273.
8. Холдеев Г.В., Сюр Т.А. Электрохимия монокристаллов переходных металлов с хорошо аттестованными поверхностями // Успехи химии. 1992. Т. 61, № 4. С. 734–764.
9. Чернов А.А. Катодная электроника: учебное пособие: сборник задач. М.: ГИЭМ, 2011. 35 с.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 621.382.029.6

**Оценка работы выхода электронов из углеродной пленки,
полученной электродуговым распылением графита в магнитном поле**

**Залим Мухамедович Хамдохов¹, Заур Чамилович Маргушев^{2,3}, Хамидби Хабасович Лосанов³,
Тешев Руслан Шагбанович⁴**

^{1,2} Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, Нальчик, Россия

^{3,4} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

¹ hamdohov@mail.ru

² zmargush@yandex.ru

³ losanovh@mail.ru

Аннотация. Исследованы автоэмиссионные характеристики углеродных пленок, полученных электродуговым распылением графита в магнитном поле. На основе анализа экспериментальных прямых Фаулера – Нордгейма показано, что работа выхода электронов из углеродной пленки составила ~ 0,2 эВ. Вольтамперные характеристики снимались при межэлектродном расстоянии 10 мкм (от поверхности углеродной пленки и анода при комнатной температуре).

Ключевые слова: автоэмиссионная характеристика, углеродная пленка, электродуговой метод, работа выхода электронов

Для цитирования: Хамдохов З.М., Маргушев З.Ч., Лосанов Х.Х., Тешев Р.Ш. Оценка работы выхода электронов из углеродной пленки, полученной электродуговым распылением графита в магнитном поле // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 34–37.

PHYSICS

Original article

**Evaluation of the work function of electrons from
a carbon film obtained by electric arc sputtering of graphite in a magnetic field**

Zalim M. Khamdokhov¹, Zaur Ch. Margushev^{2,3}, Khamidbi Kh. Losanov³, Ruslan Sh. Teshev

^{1,2} Institute of Informatics and Regional Management Problems, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

³ Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹ hamdohov@mail.ru

² zmargush@yandex.ru

³ losanovh@mail.ru

Abstract. The autoemission characteristics of carbon films obtained by electric arc sputtering of graphite in a magnetic field were studied. Based on the analysis of the experimental Fowler-Nordheim curves, it was shown that the work function of electrons from the carbon film was ~ 0.2 eV. The current-voltage characteristics were measured at a distance of 10 μm between the carbon film surface and the anode at room temperature.

Keywords: auto-emission characteristic, carbon film, electric arc method, electron work function

For citation: Khamdokhov Z.M., Margushev Z.Ch., Losanov Kh.Kh., Teshev R.Sh. Evaluation of the work function of electrons from a carbon film obtained by electric arc sputtering of graphite in a magnetic field // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):34–37.

Введение

В настоящее время наиболее перспективны автоэмиссионные катоды на основе углеродных наноматериалов (графен, углеродные нанотрубки), отличающиеся высокой стабильностью тока эмиссии и невысокими величинами рабочего напряжения [1–4]. Для получения углеродных нанотрубок широко используется электродуговой метод, заключающийся в распылении графитового электрода в плазме дугового разряда, горящего в атмосфере инертного газа посредством дугового разряда между электродами с последующей конденсацией и ростом наночастиц [5–7]. Однако проблема получения автоэмиссионных катодов на основе таких материалов для приборов вакуумной электроники не получила завершеного технического решения и продолжает оставаться актуальной проблемой.

Цель работы – экспериментально-расчетная оценка работы выхода электронов из углеродных пленок, полученных электродуговым методом с применением магнитного поля для фильтрации углеродной плазмы от микрочастиц графита.

Методика работы

Объектом исследования послужили катоды на основе автоэмиссионных сред из углеродных пленок, нанесенных электродуговым методом на алюминиевые пластины толщиной 2 мм. Исследуемые углеродные пленки были получены на установке вакуумного напыления износостойких покрытий УВНИПА. Осаждение пленок проводилось при температуре не более 80 °С и токе дуги 70 А. На образец подавался отрицательный потенциал 150 В. Толщина покрытий (примерно 0,3 мкм) контролировалась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4. Топография поверхности исследуемых образцов углеродных пленок проводилась с помощью растрового электронного микроскопа JEOLJSM-6610LV.

Исследование автоэмиссионных характеристик углеродных пленок проводилось в вакуумной камере со шлюзовым устройством, позволяющим измерять автоэмиссионные токи различных образцов за один цикл откачки (рисунок 1). Катодно-анодный узел, представлял собой устройство с катодом из углеродной пленки и анодом из нержавеющей стали с нанесенным телевизионным люминофором. Катодно-анодный узел крепился на сменном механизме, который позволял производить перемещение катода внутри вакуумной камеры и фиксировать взаимное расположение катода и анода с точностью 5 мкм.



Рисунок 1 – Вакуумная камера для измерения ВАХ

Результаты работы

На *рисунке 2* показано типичное изображение поверхности углеродной пленки, полученное с помощью электронного микроскопа.

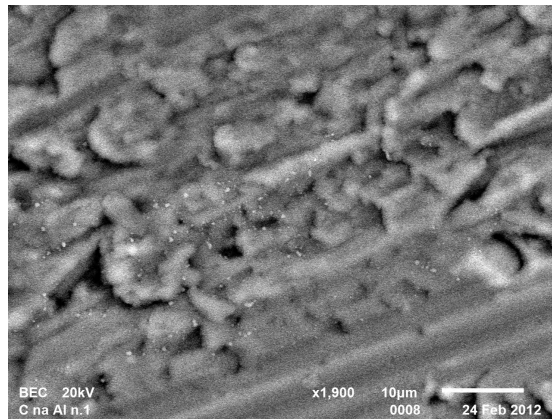


Рисунок 2 – Электронное изображение поверхности углеродной пленки

Видно, что пленка имеет практически гладкую поверхность.

Исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) образцов проводились в камере, из которой откачивался воздух до давления 6×10^{-4} Па при межэлектродном расстоянии 10 мкм.

На *рисунке 3* представлена ВАХ, построенная в координатах Фаулера – Нордгейма. Здесь I – ток эмиссии, V – напряжение. Как видно из рисунка, ВАХ является прямолинейной, то есть наблюдается автоэлектронная эмиссия.

Работа выхода электронов из углеродной пленки, содержащей углеродные нанотрубки, определяется формулой [8]:

$$\phi = \sqrt[3]{(3,549 \cdot 10^{-8} k \operatorname{tg} \alpha)^2}, \quad (1)$$

где $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона прямой Фаулера–Нордгейма относительно оси абсцисс, ϕ – работа выхода электронов, k – коэффициент усиления поля.

Используя тангенс угла наклона прямой, полученный из экспериментальной ВАХ [8], и расчетное значение коэффициента усиления поля для углеродных нанотрубок, равное 160, согласно работе по формуле 1 можно оценить значение $\phi \sim 0,2$ эВ.

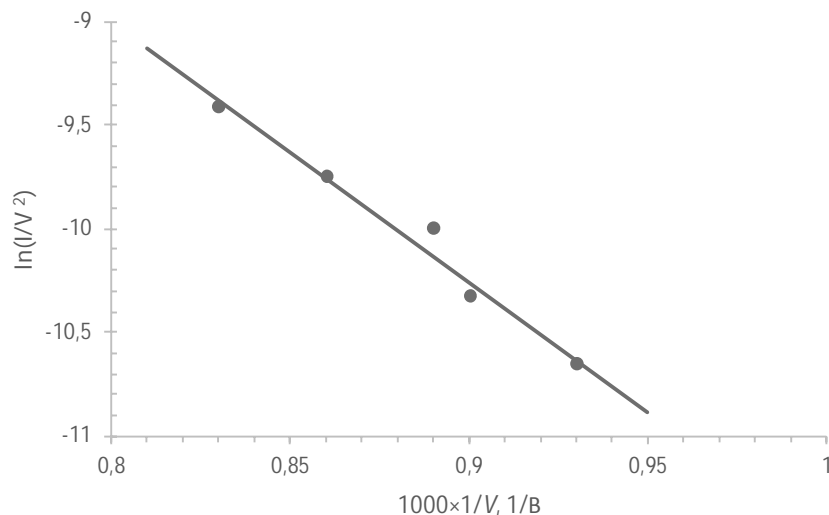


Рисунок 3 – Экспериментальная зависимость автоэмиссионного тока углеродной пленки от напряженности поля

Заключение

Исследованы автоэмиссионные характеристики углеродных пленок, полученных электродуговым распылением графита в магнитном поле. На основе анализа экспериментальных ВАХ показано, что работа выхода электронов из углеродной пленки составила $\sim 0,2$ эВ.

Библиография

1. Гуляев Ю.В. Углеродные нанотрубные структуры – новый материал для эмиссионной электроники // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 5. С. 389–391.
2. Конакова Р.В., Охрименко О.Б., Светличный А.М., Агеев О.А., Волков У.Ю., Коломийцев А.С., Житяев И.Л., Спиридонов О.Б. Характеризация автоэмиссионных катодов на основе пленок графена на SiC // ФТП. 2015. Т. 49, № 9. С. 1278–1281.
3. Фурсей Г.Н., Поляков М.А., Кантонистов А.А., Яфасов А.М., Павлов Б.С., Божевольнов В.Б. Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 6. С. 71–77.
4. Савельев С.Г., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В., Григорьев Ю.А. Исследование пленочных углеродных катодов, полученных методом пиролиза гептана // Материалы международной конференции «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ». Саратов, 2001. С. 138.
5. Хамдохов Э.З., Тешев Р.Ш., Хамдохов З.М., Хамдохов А.З., Калажоков З.Х., Калажоков Х.Х. Получение углеродных пленок методом электродугового распыления графита в магнитном поле // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 12. С. 68–73.
6. Khamdokhov Z.M., Margushev Z.Ch., Kalazhokov Z.Kh., Kushchov Kh.B., Kalazhokov Kh.Kh., Teshev R.Sh. On the Phase Composition of Nanoscale Metal – Carbon Films Produced by the Two-Evaporator Method // The Journal of Surface Investigation. X-ray Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17, N 6. P. 8317–8321.
7. Хамдохов З.М., Маргушев З.Ч. Особенности структуры композитных пленок Cu-C, полученных ионно-плазменным методом // Труды МФТИ. 2024. Т. 16, № 3. С. 127–132.
8. Григорьев Ю.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д., Пименов В.Г. Экспериментально-расчётная оценка работы выхода электронов из материалов автоэмиссионных катодов при анализе их качества // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 3 (40), № 1. С. 119–124.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 538.91:548.562

Параметр неравновесности гидратообразования и его применение для интерпретации состава гидратной фазы

Никита Андреевич Шостак^{1,2}

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

² Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия, nikeith@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема интерпретации состава клатратных гидратов, формирующихся в условиях неполного термодинамического равновесия. Показано, что в реальных системах гидратообразование часто протекает в неравновесных режимах, при которых экспериментально наблюдаемые составы гидратной фазы отличаются от предельных равновесных значений. Для учета степени завершенности фазового превращения введен безразмерный параметр неравновесности, характеризующий переход системы от исходного к равновесному состоянию гидратной фазы.

Ключевые слова: клатратные гидраты, неравновесные процессы, состав гидрата, параметр неравновесности, гидратообразование

Для цитирования: Шостак Н.А. Параметр неравновесности гидратообразования и его применение для интерпретации состава гидратной фазы // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 38–41.

Original article

The parameter of nonequilibrium hydrate formation and its application to interpret the composition of the hydrate phase

Nikita A. Shostak^{1,2}

¹ Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia, nikeith@mail.ru

² Kuban State University, Krasnodar Krai, Krasnodar, Russia

Abstract. The problem of interpreting the composition of clathrate hydrates formed under conditions of incomplete thermodynamic equilibrium is considered. It is shown that in real systems, hydrate formation often occurs in nonequilibrium regimes, in which the experimentally observed compositions of the hydrate phase differ from the maximum equilibrium values. To account for the degree of completion of the phase transformation, a dimensionless disequilibrium parameter is introduced that characterizes the transition of the system from the initial to the equilibrium state of the hydrate phase.

Keywords: clathrate hydrates, nonequilibrium processes, hydrate composition, nonequilibrium parameter, hydrate formation

For citation: Shostak N.A. The Hydrate Formation Equilibrium Parameter and Its Application for Interpreting the Composition of the Hydrate Phase // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):38–41.

Введение

Клатратные гидраты представляют собой кристаллические соединения включения, образующиеся при взаимодействии воды с газами или летучими жидкостями при низких температурах и повышенном давлении.

нии [1]. В последние десятилетия гидраты активно изучаются в связи с их ролью в природных процессах, а также с практическими задачами нефтегазовой промышленности, хранения и разделения газов [2].

Термодинамическое описание гидратообразования позволяет определить условия фазового равновесия и предельный состав гидратной фазы [3]. Однако многочисленные экспериментальные исследования показывают [4], что в реальных условиях гидратообразование часто протекает в неравновесных условиях, при которых система не достигает равновесия за характерное время технологического процесса. В таких условиях наблюдаемые составы гидратной фазы могут существенно отличаться от расчетных равновесных значений.

На практике гидратообразование часто протекает в условиях ограниченного времени контакта фаз и нестационарного тепло- и массопереноса, что приводит к формированию гидратной фазы с промежуточным составом. В таких условиях применение исключительно равновесных моделей затрудняет интерпретацию экспериментальных данных и требует введения дополнительных описательных параметров.

В связи с этим возникает задача учета степени завершенности гидратообразования при интерпретации экспериментальных данных. Целью настоящей работы является введение простого параметра, позволяющего количественно учитывать неравновесность процесса и описывать состав гидратной фазы в промежуточных состояниях между исходной газо-водной системой и предельным равновесием.

Постановка задачи

Рассмотрим систему «газ – вода – гидрат», находящуюся при заданных температуре и давлении. Для каждого компонента газовой смеси можно определить равновесный состав гидратной фазы, соответствующий предельному термодинамическому равновесию. В этом случае состав гидрата определяется исключительно термодинамическими константами включения и не зависит от истории процесса.

Ранее предпринимались попытки описания кинетики гидратообразования с использованием формальных математических моделей, учитывающих характерные времена фазового превращения. Однако подобные подходы, как правило, требуют детального задания кинетических коэффициентов и не всегда удобны для интерпретации экспериментальных данных в условиях неполного равновесия. В результате было получено уравнение с однородным дифференциальным оператором второго порядка [5], решение которого может быть найдено в виде степенного ряда по переменной, равной отношению времени, за которое происходят фазовые превращения, ко времени, необходимому для достижения равновесного состояния в системе. В целом это соответствует теории физического подобия « π – теореме», но в реальных условиях гидратообразование может быть ограничено скоростью массопереноса, теплопереноса или временем контакта фаз. В результате формирование гидратной фазы останавливается на промежуточной стадии, не достигающей равновесия. В этом случае требуется дополнительный параметр, характеризующий степень реализации фазового превращения.

Введение параметра неравновесности

Для учета степени завершенности гидратообразования введен безразмерный параметр неравновесности \dot{A} , принимающий значения в интервале $0 \leq \dot{A} \leq 1$.

Параметр \dot{A} характеризует отношение текущего состояния системы к предельному равновесному состоянию гидратной фазы. Введенный параметр \dot{A} не является скоростью или коэффициентом массопереноса. Он представляет собой интегральную характеристику степени реализованности фазового превращения, усредняющую влияние кинетических и тепловых факторов без их явного разложения.

При $\dot{A} = 0$ фазовое превращение отсутствует и система соответствует исходной газо-водной смеси.

При $\dot{A} \rightarrow 1$ система стремится к термодинамическому равновесию, и состав гидратной фазы совпадает с равновесным.

В простейшем виде параметр неравновесности может быть задан в виде релаксационной зависимости:

$$\dot{A} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right) \quad (1)$$

где t – характерное время процесса, а t_p – время релаксации системы.

Данное выражение удовлетворяет предельным условиям $\dot{A} \rightarrow 0$ при $t \ll t_p$ и $\dot{A} \rightarrow 1$ при $t \gg t_p$.

Используется простая релаксационная аппроксимация, согласованная с предельными условиями $\dot{A} \rightarrow 0$ при $t/t_p \rightarrow 0$ и $\dot{A} \rightarrow 1$ при $t/t_p \rightarrow \infty$.

Модель определения состава гидратной фазы

Предположим, что в условиях неполного гидратообразования состав гидратной фазы определяется вкладом двух предельных состояний: равновесного состава гидрата и состава внешней газовой фазы. Тогда состав i -го компонента в гидрате можно представить в виде:

$$X_i = \dot{A} X_i^{eq} + (1 - \dot{A}) Y_i, \quad (2)$$

где X_i^{eq} – равновесная доля компонента в гидрате, а Y_i – доля компонента во внешней газовой фазе.

Линейная форма выражения (2) отражает предположение о монотонном перераспределении компонентов между внешней фазой и гидратной структурой по мере роста степени завершенности фазового превращения. В рамках рассматриваемого подхода такая аппроксимация является минимально необходимой для обеспечения корректного перехода между предельными состояниями $\dot{A} = 0$ и $\dot{A} = 1$.

Данная формула отражает физический смысл параметра \dot{A} : при малых значениях \dot{A} состав гидрата близок к составу внешней фазы, тогда как при $\dot{A} \rightarrow 1$ он стремится к равновесному составу.

Обсуждение результатов

Для иллюстрации предложенного подхода рассмотрены расчеты состава гидратной фазы для типичных гидратообразователей при фиксированной температуре и нескольких значениях давления. Расчеты выполнены для различных значений параметра неравновесности \dot{A} .

Описанный метод расчета позволяет определить количество поглощаемого гидратом вещества и его компонентный состав из исходной многокомпонентной смеси в процессе гидратообразования, когда система находится в неравновесном состоянии ($\dot{A} \neq 1$), а также в предельном равновесном состоянии ($\dot{A} = 1$), соответствующем окончанию этого процесса. Параметр \dot{A} трактуется как мера кинетической реализованности фазового превращения и связанного с ним перераспределения компонентов между фазами (рисунк 1). На рисунке 2 показано, как меняется доля перешедшего в гидратную фазу вещества при изменении параметра \dot{A} , характеризующего степень фазового превращения.

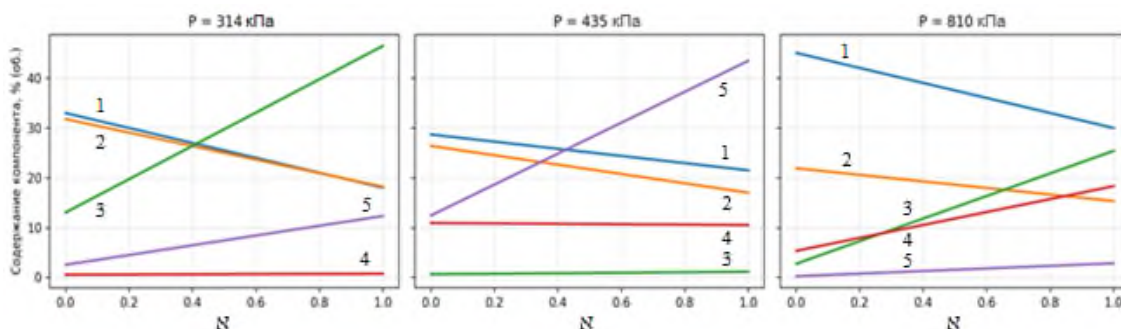


Рисунок 1 – Влияние параметра неравновесности \dot{A} на состав гидратной фазы при $T = 273.1$ К и различных давлениях, линии синяя – CH_4 , оранжевая – C_2H_6 , зеленая – C_3H_8 , красная – C_3H_6 , фиолетовая – $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$

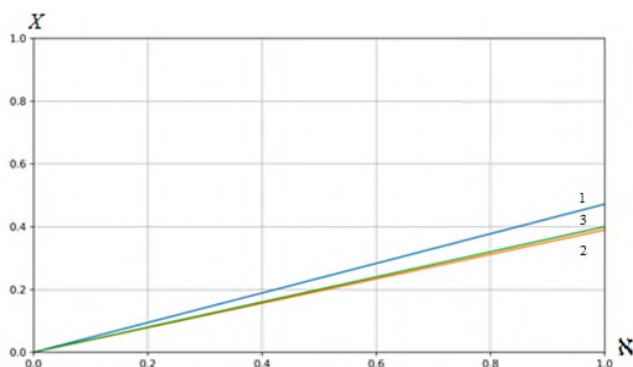


Рисунок 2 – Изменение доли метана X , перешедшего в гидратную фазу от параметра неравновесности \dot{A} , линии характеризуют давление: 1 – 0,395 МПа, 2 – 0,486 МПа, 3 – 0,810 МПа

Как видно из представленных зависимостей, изменение параметра \dot{A} приводит к различным траекториям изменения состава гидратной фазы даже при фиксированных термобарических условиях. Это подтверждает, что учет неравновесности является принципиально важным при анализе экспериментальных данных.

При $\dot{A} = 0$ состав соответствует исходной газо-водной системе, при $\dot{A} \rightarrow 1$ – предельному равновесному состоянию. Представленная зависимость носит иллюстративный характер и отражает монотонность кинетического перехода.

При $\dot{A} = 0$ фазовое превращение отсутствует ($\dot{A} = 0$), поэтому X_i не определены физически; в этом пределе показаны предельные линии, согласованные с составом внешней фазы $Y_i \rightarrow U_i$ (исходный состав газа/смеси).

Полученные результаты показывают, что при промежуточных значениях \dot{A} (0,3–0,7) состав гидратной фазы существенно отличается от равновесного, что согласуется с экспериментальными наблюдениями, описанными в литературе. Введение параметра \dot{A} позволяет интерпретировать такие отклонения без необходимости введения дополнительных эмпирических коэффициентов.

По существу, соотношение времен является параметром Дамкёлера:

$$Da_H = \frac{\tau}{\tau_p}, \quad (3)$$

служащее критерием степени завершенности фазового превращения.

Тогда параметр неравновесности можно записать в виде

$$\dot{A} = F(Da_H). \quad (4)$$

Величина Da_H определяет режим процесса:

- $Da_H < 1$ – перенос доминирует над фазовым превращением, рост гидрата подавлен;
- $Da_H > 1$ – скорость образования гидрата определяется его внутренней кинетикой;
- $Da_H \approx 1$ – переходная область, где проявляются метастабильные состояния.

Таким образом, параметр \dot{A} фактически является функцией, аналогичной числу Дамкёлера, что обеспечивает связь кинетического описания с термодинамическими характеристиками системы. Кроме того, \dot{A} отражает меру «завершенности» гидратообразования, тесно связанную с диффузией и теплопереносом: $\dot{A} \rightarrow 1$ соответствует режиму, где равновесие определяется термодинамикой; $\dot{A} \rightarrow 0$ – когда кинетика полностью подавляет фазовый переход.

Описанный метод расчета позволяет определить количество поглощаемого гидратом вещества и его компонентный состав из исходной многокомпонентной смеси в процессе гидратообразования, когда система находится в неравновесном состоянии ($\dot{A} \neq 1$), а также в предельном равновесном состоянии ($\dot{A} = 1$), соответствующем окончанию этого процесса.

Следует отметить, что предложенная модель предназначена, прежде всего, для качественной и полуколичественной интерпретации данных. Тем не менее она обеспечивает корректный переход между исходным и равновесным состояниями системы.

Выводы

В работе предложен простой подход к учету неравновесности процессов гидратообразования на основе введения безразмерного параметра \dot{A} . Показано, что использование данного параметра позволяет описывать состав гидратной фазы в промежуточных состояниях между исходной газо-водной системой и термодинамическим равновесием. Предложенная модель может быть использована при интерпретации экспериментальных данных и при инженерных оценках процессов гидратообразования.

Преимуществом предложенного подхода является его простота и возможность использования без детального задания кинетических коэффициентов, что делает его удобным для практического анализа и предварительных инженерных оценок.

Библиография

1. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases. Boca Raton: Taylor & Francis / CRC Press, 2008. 720 p.
2. Carroll J. Natural Gas Hydrates: A Guide for Engineers. Oxford: Gulf Professional, 2014. 340 p.
3. Schicks J.M. Gas hydrates in nature and in the laboratory: necessary requirements for formation and properties of the resulting hydrate phase // ChemTexts. 2022. V. 8, N 13. P. 1–10.
4. Hassanpouryouzband A., Joonaki E., Farahani M.V., et al. Gas hydrates in sustainable chemistry // Chem. Soc. Rev. 2020. V. 49. P. 5225–5309.
5. Шостак Н.А., Бунякин А.В. Математическое моделирование распределения компонентов при гидратообразовании // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2025. Т. 22, № 4. С. 56–61.

ХИМИЯ

Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 1. С. 42–47.
Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University. 2026. Vol. 16, no. 1. P. 42–47.

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 541.64

Влияние графеновых наночастиц на прочность полилактида при его модификации

Альбина Мухамедовна Алтуева¹, Карина Руслановна Кожемова², Марат Хамидович Алтуев³, Назифат Мухтаровна Мирзоева⁴

^{1,2,3,4} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

¹ k-a.albina@mail.ru

² kozhemova88@mail.ru

³ k-a.albina@mail.ru

⁴ mnazifa@bk.ru

Аннотация. Полилактид (PLA) – перспективный биоразлагаемый полимер, активно используемый в 3D-печати, упаковке и биомедицине. Однако его применение ограничено низкой механической прочностью и термостойкостью. В настоящей работе исследуется возможность улучшения этих характеристик за счёт модификации PLA наночастицами графена.

Ключевые слова: полилактид, графен, наполнители, термостойкость и термостабильность

Для цитирования: Алтуева А.М., Кожемова К.Р., Алтуев М.Х., Мирзоева Н.М. Влияние графеновых наночастиц на прочность полилактида при его модификации // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 42–47.

CHEMISTRY

Original article

Influence of graphene nanoparticles on the strength of polylactide during its modifications

Albina M. Altueva¹, Karina R. Kozhemova², Marat Kh. Altuev³, Nazifat M. Mirzoeva⁴

^{1,2,3,4} Kabardino-Balkarian State University, Nal'chik, Russia

¹ k-a.albina@mail.ru

² kozhemova88@mail.ru

³ k-a.albina@mail.ru

⁴ mnazifa@bk.ru

Abstract. Polylactide (PLA) is a promising biodegradable polymer widely used in 3D-printing, packaging, and biomedicine. However, its application is limited by insufficient mechanical strength and low thermal stability. This study explores the possibility of improving these properties by modifying PLA with graphene nanoparticles.

Keywords: polylactide, graphene, fillers, heat resistance and thermal stability

For citation: Altueva A.M., Kozhemova K.R., Altuev M.Kh., Mirzoeva N.M. The Influence of Graphene Nanoparticles on the Strength of Polylactide during Its Modification // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026. 2026;16(1):42–47.

Введение

В последние годы наблюдается устойчивая тенденция к постепенному отказу от традиционных нефтяных синтетических полимеров в пользу биополимеров, получаемых из возобновляемого природного сырья. Эта трансформация обусловлена как экологическими соображениями, так и стремлением к созданию материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, комплексно влияющими на свойства конечной продукции [1].

Особое внимание в этом контексте привлекает полилактид (PLA) – термопластичный алифатический полиэфир, синтезируемый из молочной кислоты [2, 3]. Молочная кислота, являясь простейшей α -гидроксикислотой, содержит хиральный центр и существует в виде двух оптических изомеров – L- и D-форм. PLA получают преимущественно двумя способами: прямой поликонденсацией молочной кислоты или кольцевой полимеризацией её циклического димера – лактида [4, 5].

Сырьём для производства молочной кислоты служат возобновляемые углеводы, такие как глюкоза, сахароза или лактоза. В зависимости от соотношения L- и D-изомеров в исходной смеси лактидов (L,L-, D,D- и мезо-D,L-форм) возможно целенаправленное регулирование стереоструктуры полимера, что позволяет получать как аморфные, так и полукристаллические разновидности PLA с заданными физико-химическими свойствами [6, 7].

Ключевыми достоинствами PLA являются его биосовместимость, нетоксичность, способность образовывать прочные плёнки и волокна, высокая диэлектрическая проницаемость, а также чувствительность к незначительным изменениям состава, позволяющая точно настраивать свойства материала [8]. Тем не менее, широкому применению PLA препятствуют ряд ограничений: относительно высокая стоимость, ограниченная долговечность, низкая термостабильность, повышенная хрупкость и гидрофильность [7, 8].

Одним из важнейших факторов, определяющих характеристики и выход конечного продукта, является выбор катализатора. Традиционно в синтезе PLA применяются металлоорганические катализаторы, обеспечивающие высокую эффективность реакции, но вызывающие загрязнение полимера металлами и усложняющие его последующую очистку. В связи с этим всё большее распространение получают металло-свободные каталитические системы, сочетающие высокую активность с экологической и биомедицинской безопасностью.

Несмотря на указанные недостатки, PLA активно используется в упаковке, биомедицине и аддитивных технологиях (в частности, в 3D-печати) [10]. Для преодоления ограничений, связанных с его механическими и термическими свойствами, применяются стратегии модификации: создание полимерных blends или введение функциональных наполнителей, в том числе наноразмерных, таких как графен.

Особое внимание в последнее время уделяется исследованию термической деструкции PLA-композиций, содержащих графеновые наполнители, что обусловлено необходимостью повышения их термостойкости и снижения горючести [8].

Экспериментальная часть

Целью настоящего исследования является оценка влияния различных концентраций графена на механическую прочность (в том числе растяжимость) и термостойкость модифицированного полилактида.

Для исследования механических свойств модифицированного полилактида (PLA) в качестве исходного материала был выбран гранулированный PLA, произведённый компанией FDplast (Россия). Основные характеристики используемого полимера приведены в *таблице 1*.

Таблица 1 – Физико-механические и термические характеристики исходного полилактида (PLA, FDplast, Россия)

Характеристика	Значение	Единица измерения
Плотность материала	1,25	г/см ³
Температура тепловой деформации (при 0,45 МПа)	52	°С
Температура стеклования: примерно 60 °С	60	°С
Температура плавления	от 170 до 180	°С
Термостойкость	до 70	°С
Индекс текучести расплава	4	г/10 мин (190 °С/2,16 кг)
Предел прочности при растяжении	65	МПа
Относительное удлинение при разрыве	12	%
Прочность при изгибе	75	МПа
Модуль упругости при изгибе	2102	МПа
Диаметр филамента	1,75±0,03	мм
Ударная прочность по Изоду	8,5	Дж/м

В качестве нанонаполнителя для формирования композиционного материала использовался графен – двумерная аллотропная модификация углерода, состоящая из одного атомного слоя, в котором атомы упорядочены в гексагональную решётку (рисунок 1).

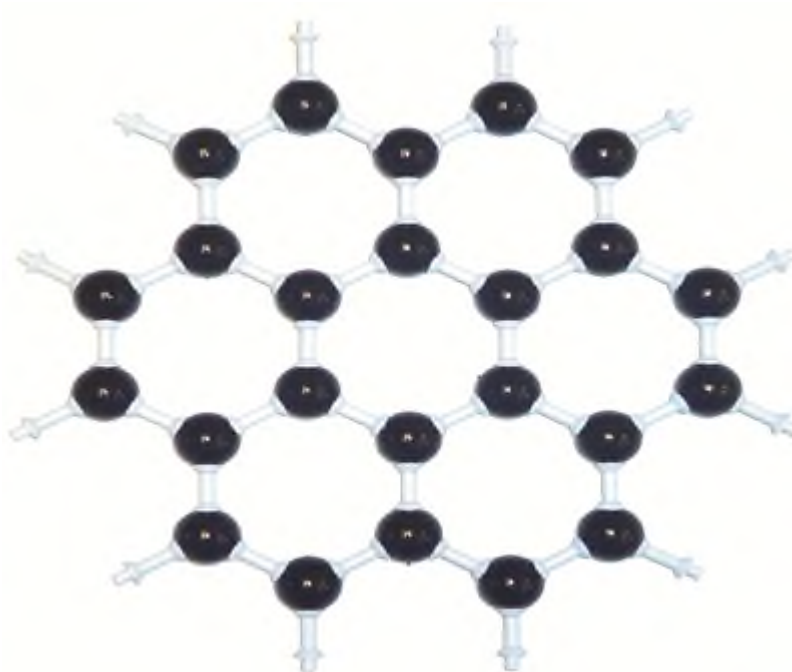


Рисунок 1 – Кристаллическая решетка графена

Графен характеризуется чрезвычайно низкой поверхностной плотностью ($0,77 \text{ мг/м}^2$) и рекордно высокой удельной поверхностью – до $2600 \text{ м}^2/\text{г}$ (таблица 2). Эти особенности обуславливают его высокую реакционную способность и эффективность даже при минимальных концентрациях в полимерной матрице, что делает его перспективным компонентом для модификации таких биополимеров, как полилактид (PLA).

Таблица 2 – Характеристики графена

Характеристика	Показатель	Единицы измерения
Плотность материала	0,77	мг/м ²
Модуль сдвига	280	ГПа
Модуль Юнга (жесткость) при растяжении	1	ТПа
Прочность	100	ГПа
Температура плавления	5000	К

Для получения PLA-графеновых нанокомпозитов в качестве наполнителя использовали графен. Поскольку порошкообразный графен склонен к агрегации и плохо диспергируется в полимерной матрице, его предварительно стабилизировали в виде водной дисперсии с помощью резольной фенолформальдегидной смолы Фенотам GR-326 (АО «Пигмент», Россия). Такая модификация обеспечила высокую устойчивость и однородность распределения нанопластин в растворе.

Смешение дисперсии графена с расплавленным PLA проводили методом ультразвуковой эксфолиации при следующих параметрах: мощность – 2 кВт, частота – 22 кГц, интенсивность УЗ-воздействия – $50 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$. Процесс длился 2 часа с непрерывным охлаждением реакционной массы проточной водой для предотвращения термического разложения полимера.

После обработки композит осаждали, промывали водой и сушили в вакуумном шкафу при $50 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 минут.

Были получены три состава:

- контрольный образец – чистый PLA (0 % графена);
- образец А – PLA + 10 масс. % графена;
- образец В – PLA + 20 масс. % графена.

Для стандартизации испытаний все материалы экструдировали в филаменты диаметром 1,75 мм и длиной 70 мм с использованием экструдера.

Механические испытания на растяжение проводили при температуре 19 °С, влажности 60 % и скорости деформации 2 мм/мин.

Термостойкость оценивали методом термогравиметрического анализа (ТГА). Образцы массой 200 мг нагревали на воздухе от 293 К до 873 К со скоростью 10 °С/мин в керамических тиглях.

В исследовании были использованы три типа образцов: чистый полилактид (PLA) без наполнителя, а также композиты с добавлением графена в концентрациях 0,1 масс. % и 0,2 масс. %. Основной оценкой механических свойств полученных материалов служил предел прочности при растяжении, результаты которого представлены на *рисунке 2*.

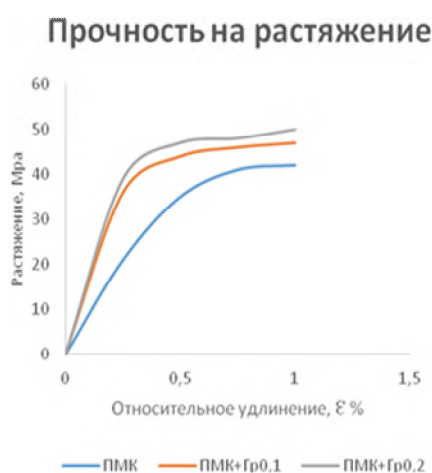


Рисунок 2 – Прочность на растяжение композитов на основе PLA

Анализ данных показал, что введение даже незначительного количества графена оказывает заметное влияние на прочностные характеристики PLA. Образец с содержанием 0,1 % графена продемонстрировал повышение прочности по сравнению с контрольным PLA, что свидетельствует о хорошей совместимости наполнителя с полимерной матрицей и эффективной передаче нагрузки на наночастицы. При увеличении концентрации до 0,2 % наблюдался дальнейший рост прочности, однако темп упрочнения замедлился, а в некоторых случаях отмечалась повышенная хрупкость образцов, вероятно, вследствие частичной агрегации графеновых пластинок и нарушения однородности структуры.

Таким образом, можно заключить, что низкие концентрации графена (до 0,2 %) позволяют целенаправленно модифицировать механические свойства PLA, однако превышение оптимального содержания может привести к снижению качества дисперсии и ухудшению эксплуатационных характеристик композита. Полученные результаты подтверждают перспективность использования графена в качестве высокоэффективного наномодификатора.

Как видно из представленных данных, нанокompозиты с добавлением графенового наполнителя (0,1 и 0,2 %) демонстрируют заметное увеличение как предела прочности при растяжении, так и модуля упругости по сравнению с чистым полилактидом (обозначен синей линией). Наблюдается четкая тенденция к росту прочностных характеристик с увеличением концентрации наномодификатора.

Одновременно с этим отмечается снижение относительного удлинения при разрыве, что указывает на повышение жесткости и хрупкости материала при введении графеновых наноструктур. Такое поведение типично для армированных полимерных систем, где усиление механических свойств достигается за счет некоторого уменьшения пластичности.

Таким образом, полученные в ходе исследования нанокompозиты характеризуются улучшенной прочностью и жёсткостью, что делает их перспективными для применения в областях, где требуются повышенные механические характеристики при сохранении биосовместимости и экологичности исходного PLA.

Анализ термогравиметрических кривых (рисунок 3) показал, что введение графена в матрицу полилактида (PLA) положительно влияет на его термическую стабильность. Основной этап термодеструкции как чистого PLA, так и его композитов начинается при температурах выше 300 °С, что соответствует разложению полимерной цепи вследствие разрыва эфирных связей.

При этом нанокompозит с содержанием 0,2 % графена (PLA/Gr-0,2) демонстрирует повышение температуры начала разложения примерно на 5 °С по сравнению с исходным полимером. Это указывает на способность графеновых нанопластин замедлять деградацию PLA, вероятно, за счёт формирования физического барьера, ограничивающего диффузию летучих продуктов разложения.

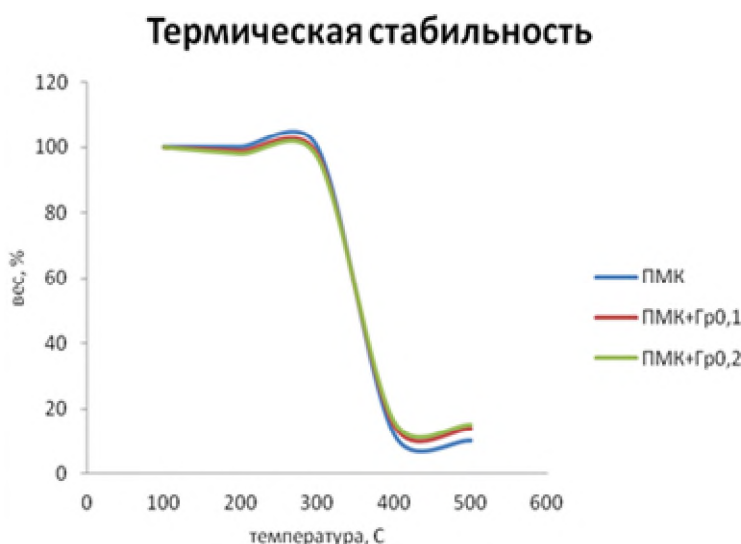


Рисунок 3 – Термическая стабильность PLA и его нанокompозитов

Таким образом, даже минимальные добавки графена позволяют достоверно улучшить термостойкость PLA, что подтверждает его потенциал в качестве функционального нанонаполнителя для термически нагружаемых биополимерных материалов [8].

Результаты исследования подтверждают, что введение графеновых наночастиц в полилактид (PLA) в количестве 0,1–0,2 масс. % приводит к достоверному улучшению его механических и термических характеристик. Установлено повышение прочности при растяжении, увеличение модуля упругости и рост температуры начала термодеструкции на ~5 °С, что свидетельствует об усилении и термостабилизации полимерной матрицы.

Одновременно наблюдается снижение пластичности композита, что типично для армированных систем и требует баланса между жёсткостью и ударной вязкостью при проектировании материала под конкретные задачи.

Полученные данные демонстрируют высокий потенциал графена как функционального наномодификатора для биополимеров. Вместе с тем, для перехода от лабораторных образцов к промышленному применению необходимы дальнейшие работы по оптимизации состава, улучшению дисперсности наполнителя и оценке технологичности переработки композитов.

Таким образом, разработка PLA-графеновых нанокompозитов открывает реальные перспективы для создания экологически безопасных материалов с расширенным функционалом, в том числе для аддитивных технологий, биомедицины и упаковки, где важны одновременно прочность, термостойкость и биосовместимость.

Библиография

1. Чичварин А.В., Игуменова Т.И. Явление стабилизации теплового старения связующих на основе товарного полибутадиена смесью фуллеренов группы // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 4. С. 142–144.
2. Jem K.J., Jem K.J., Van der Pol J.F., De Vos S., Chen G.G.-Q. Microbial Lactic Acid. Its Polymer Poly(lactic acid) and their industrial Applications, Plastics from Bacteria: Natural Functions and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 323–346.
3. Garlotta D.A. Literature review of poly(lactic acid) // J. Polym. Environ. 2011. V. 19, N 2. P. 63–84.
4. Ghafar T., Irshad M., Anwar Z., Aqil T., Zulifqar Z., Tarig A., Kamran M., Ehsan N., Mehmood S. Recent trends in lactic acid biotechnology: A brief review on production to purification // J. Radiat. Res. Appl. Sci. 2014. V. 7, N 2. P. 222–229.
5. Шутихин Е.Д. Российские и зарубежные ученые и их вклад в развитие науки о полимерах // Материалы XVI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» URL: <https://scienceforum.ru/2024/article/2018036562> (дата обращения: 24.01.2025).
6. Ave´ros L., Belgacem M.N., Gandini A. Polylactic acid: synthesis, properties and applications // In: Book: Monomers, polymers, and composites from renewable resources. Amsterdam: Elsevier Science, 2008. Chapter 21. P. 433–450.
7. Роговина С.З., Кузнецова О.П., Гасымов М.М., Ломакин С.М., Шевченко В.Г., Берлин А.А. Композиции полилактида с углеродными нанонаполнителями: получение, структура, свойства // Высокомолекулярные соединения Б. 2024. Т. 66, № 2. С. 140–155.
8. Коваленко Р.В. Современные полимерные материалы и технологии 3D печати // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 1. С. 263–266.

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 541.64

Модификация и переработка полиэтилена: современные подходы и перспективы развития

Альбина Мухамедовна Алтуева¹, Жамиля Хусейновна Токумаева², Марат Хамидович Алтуев³,
Нурали Иналович Машуков⁴

^{1,2,3,4} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

¹k-a.albina@mail.ru

²ztokumayeva@bk.ru

³k-a.albina@mail.ru

⁴mnurali@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены основные направления химической, физической и композитной модификации полиэтилена, включая функционализацию, создание нанокompозитов и использование бионаполнителей. Проанализированы современные технологии переработки отходов ПЭ: механический рециклинг, термическая переработка (пиролиз), а также перспективные методы химической деполимеризации. Показано, что интеграция модификации и рациональной переработки позволяет не только улучшить свойства материала, но и снизить его экологический след. Предложены направления дальнейших исследований, направленные на повышение качества вторичного полиэтилена и расширение областей его применения.

Ключевые слова: полиэтилен, модификация, переработка, нанокompозиты, вторичное сырьё, пиролиз, функционализация, устойчивое развитие

Для цитирования: Алтуева А.М., Токумаева Ж.Х., Алтуев М.Х., Машуков Н.И. Модификация и переработка полиэтилена: современные подходы и перспективы развития // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 48–52.

CHEMISTRY

Original article

Modification and processing of polyethylene: modern approaches and development prospects

Albina M. Altueva¹, Zhamilya Kh. Tokumaeva², Marat Kh. Altuev³, Nurali I. Mashukov⁴

^{1,2,3,4} Kabardino-Balkarian State University, Nal'chik, Russia

¹k-a.albina@mail.ru

²ztokumayeva@bk.ru

³k-a.albina@mail.ru

⁴mnurali@mail.ru

Abstract. Examines the main approaches to chemical, physical, and composite modification of polyethylene, including functionalization, the creation of nanocomposites, and the use of biofillers. Modern PE waste recycling technologies are analyzed, including mechanical recycling, thermal processing (pyrolysis), and promising methods of chemical depolymerization. It is shown that integrating modification and rational recycling not only improves the material's properties but also reduces its environmental footprint. Directions for further research aimed at improving the quality of recycled polyethylene and expanding its applications are proposed.

Keywords: polyethylene, modification, recycling, nanocomposites, secondary raw materials, pyrolysis, functionalization, sustainable development

For citation: Altueva A.M., Tokumayeva Zh.Kh., Altuev M.Kh., Mashukov N.I. Modification and Recycling of Polyethylene: Modern Approaches and Development Prospects // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):48–52.

Введение

Полиэтилен (ПЭ) – термопластичный полимер, занимающий лидирующее положение среди синтетических полимеров по объёму производства. По данным Plastics Europe, в 2023 г. мировое производство ПЭ превысило 110 млн тонн [1]. Широкое применение ПЭ в упаковке, строительстве, сельском хозяйстве и электротехнике обусловлено его высокой химической стойкостью, влагонепроницаемостью, простотой переработки и низкой стоимостью.

Вместе с тем традиционный ПЭ обладает рядом существенных недостатков: низкой поверхностной энергией (плохая адгезия), чувствительностью к ультрафиолетовому излучению, ограниченной термостойкостью и, что особенно актуально, крайне медленной биodeградацией (до 500 лет в природных условиях) [2]. Ежегодно в мире образуется более 35 млн тонн отходов ПЭ, лишь 15–20 % из которых подвергается вторичной переработке (рисунок 1) [3].

В условиях реализации принципов циркулярной экономики и требований экологической безопасности возрастает необходимость в разработке комплексных решений, сочетающих модификацию ПЭ для улучшения его свойств и эффективные методы его утилизации. Цель настоящей работы – систематизировать современные подходы к модификации и переработке полиэтилена, а также определить перспективные направления исследований в данной области.



Рисунок 1 – Области применения полиэтилена

Экспериментальная часть

Модификация полиэтилена (ПЭ) направлена на улучшение его физико-химических и механических свойств, включая повышение прочности, теплостойкости и стойкости к ультрафиолету. Основные методы включают физическое смешение с добавками/полимерами, химическое сшивание (силан, пероксиды, облучение), сополимеризацию, а также поверхностную обработку (плазма, коронный разряд) для улучшения адгезии.

Химическая модификация. Наиболее распространённый способ – сополимеризация этилена с полярными мономерами (винилацетат, акриловая кислота, метакрилаты), что приводит к образованию сополимеров типа этиленвинилацетата (EVA) или этилен-метилакрилата (EMA). Такие материалы обладают повышенной эластичностью, прозрачностью и адгезией к металлам и краскам [4].

Альтернативный подход – прививочная полимеризация (grafting), при которой на макромолекулы ПЭ прививаются функциональные группы ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$) с использованием пероксидов или радиационного инициирования. Это позволяет улучшить совместимость с наполнителями и повысить адгезию без значительного изменения объёмных свойств (рисунок 2) [5].

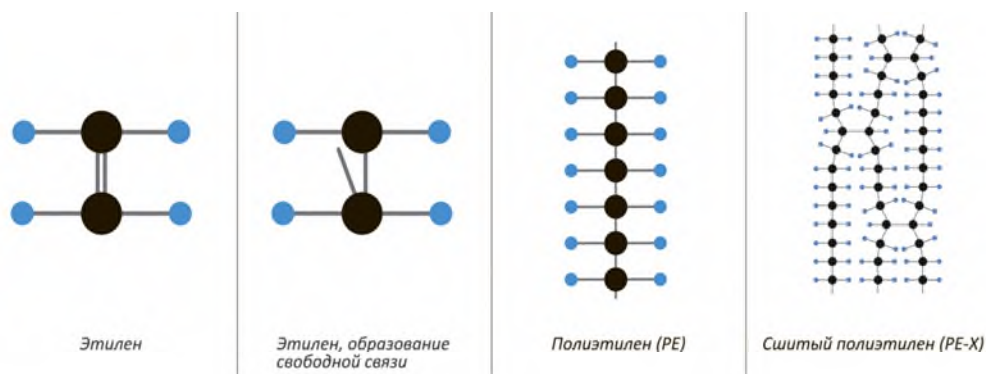


Рисунок 2 – Схема полимеризации этилена и сшивки полиэтилена: от мономера к трёхмерной сетчатой структуре (PE-X)

Физическая модификация. Поверхностная обработка (коронный разряд, плазменная активация, УФ-облучение) используется для увеличения поверхностной энергии ПЭ, что необходимо для последующей печати, ламинирования или склеивания. Такие методы не влияют на внутреннюю структуру материала, но значительно расширяют его функциональность (рисунок 3) [6].

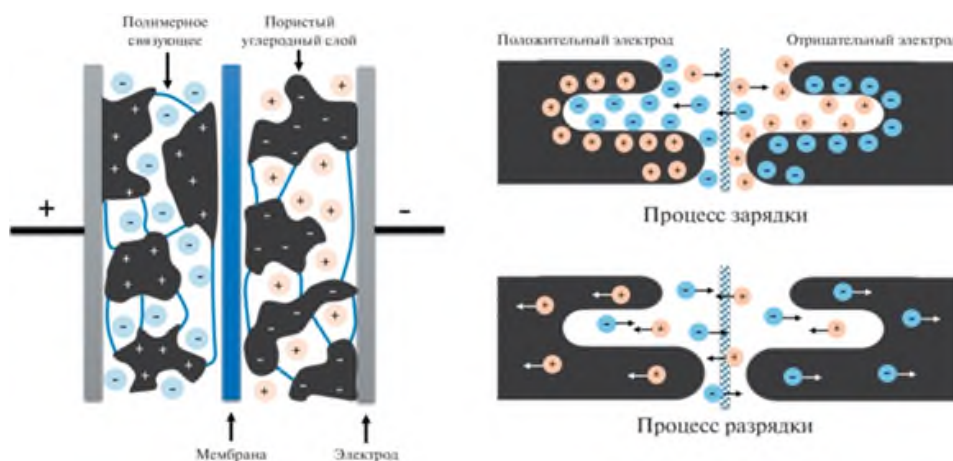


Рисунок 3 – Схема устройства суперконденсатора и процессов, приводящих к образованию двойного электрического слоя

Создание композитов на основе ПЭ с различными наполнителями является одним из наиболее перспективных направлений. Традиционные минеральные наполнители (мел, тальк) снижают стоимость и улучшают жёсткость. Более эффективны наноразмерные добавки: графен, углеродные нанотрубки, наноглина (рисунок 4). Например, введение 2 масс. % оксида графена в ПНД повышает предел прочности при растяжении на 28 % и температуру тепловой деформации на 12 °С [7].

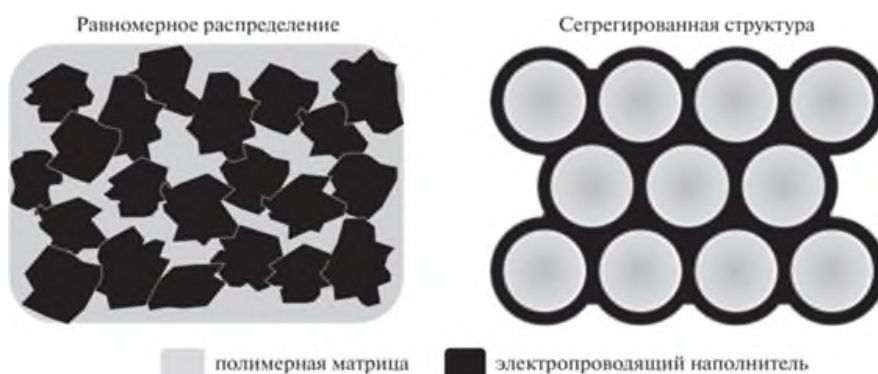


Рисунок 4 – Схема структуры композитов равномерным

распределением наполнителя и неравномерным распределением

Также активно развиваются композиты с бионаполнителями (древесная мука, шелуха риса, лён), что снижает экологический след и способствует утилизации сельскохозяйственных отходов [8].

Технологии переработки полиэтилена. Механическая переработка является наиболее экономически выгодным и широко применяемым методом. Процесс включает сортировку, мойку, дробление, экструзию и гранулирование. Полученный вторичный ПЭ (rPE) используется в производстве плёнок, труб, контейнеров и других изделий низкой ответственности. Основные ограничения – деградация полимера при многократной переработке (снижение молекулярной массы, изменение цвета) и загрязнение примесями (рисунки 5) [9].

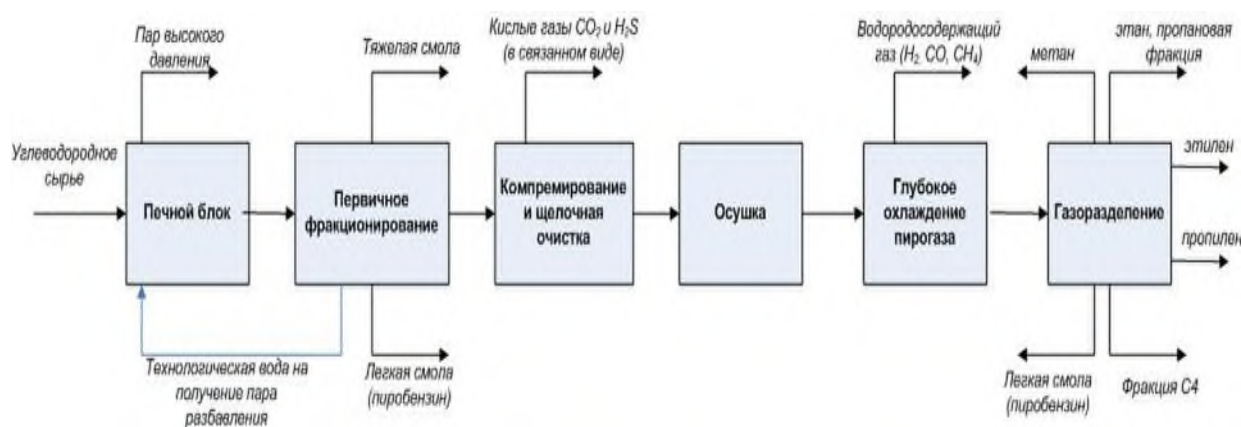


Рисунок 5 – Блок-схема этиленового производства

Термическая переработка. Пиролиз – термическое разложение ПЭ в инертной атмосфере при 400–600 °С – позволяет получать жидкие углеводороды (аналог дизельного топлива), газ и воск. Современные каталитические установки обеспечивают выход жидкого продукта до 85 % [10]. Однако высокая энергоёмкость и необходимость очистки продуктов ограничивают масштаб внедрения.

Химическая переработка. Хотя ПЭ не поддаётся классической деполимеризации, новые каталитические системы (цеолиты, MOF-материалы) позволяют селективно расщеплять его до мономеров или ценных химикатов (α -олефинов, ароматических соединений). Этот подход находится на стадии лабораторных исследований, но демонстрирует высокий потенциал.

Биологическая переработка. Традиционный ПЭ является биоразлагаемым. В настоящее время разрабатываются его модифицированные версии – например, с добавками прокатализаторов окисления (ОХО-биодegradируемые ПЭ). Однако их экологическая безопасность оспаривается, так как они распадаются на микропластик, а не на углекислый газ и воду [10].

Обсуждение и перспективы

Интеграция модификации и переработки открывает новые возможности. Например, функционализированный ПЭ легче поддаётся повторной переработке благодаря улучшенной совместимости с другими полимерами. Напротив, вторичный ПЭ может быть усилен нанонаполнителями для восстановления утраченных свойств.

Особый интерес представляет концепция «дизайна для переработки»: создание ПЭ-материалов с заранее заложенной возможностью лёгкой утилизации – например, через использование совместимых сополимеров или легко отделяемых многослойных структур.

Перспективные направления исследований:

- разработка «умных» ПЭ-композитов с контролируемым сроком службы;
- создание высокоэффективных каталитических систем для химической переработки;
- стандартизация методов оценки качества вторичного ПЭ;
- интеграция биоэтилена (из возобновляемого сырья) в производство ПЭ.

Выводы

Модификация и переработка полиэтилена являются взаимосвязанными и стратегически важными направлениями в современном материаловедении. Химические, физические и композитные методы модификации позволяют адаптировать ПЭ под специфические требования, расширяя его применение. В то же время развитие технологий вторичной переработки – от механического рециклинга до передовых методов химического разложения – способствует снижению экологической нагрузки и переходу к циркулярной экономике.

Только комплексный подход, сочетающий инновационную модификацию, рациональную переработку и ответственное потребление, позволит обеспечить устойчивое будущее для одного из самых востребованных полимеров человечества.

Библиография

1. PlasticsEurope. Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers: High-density Polyethylene (HDPE), Low-density Polyethylene (LDPE), Linear Low-density Polyethylene (LLDPE) [Электронный ресурс]. Brussels: PlasticsEurope, 2023. Режим доступа: <https://plasticseurope.org>.
2. Andrady A.L. Microplastics in the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. V. 62, N 8. P. 1596–1605.
3. Ellen MacArthur Foundation, World Economic Forum, McKinsey & Company. The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics [Электронный ресурс]. Cologny/Geneva: World Economic Forum, 2016. 100 с. Режим доступа: <https://www3.weforum.org>.
4. Петров А.В., Кузнецов И.С. Механическая переработка вторичного полиэтилена: влияние многократной экструзии на свойства // *Полимерные материалы*. 2021. № 3. С. 45–52.
5. Мустафин А.Г., Хайруллин Р.Р. Функционализация полиэтилена прививкой малеинового ангидрида // *Журнал прикладной химии*. 2020. Т. 93, № 7. С. 1023–1030.
6. Казарян М.А., Левчук С.В. Переработка полимерных отходов: современное состояние и перспективы // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2022. Т. 65, № 4. С. 5–18.
7. Gabara W., Porejko S. Grafting of maleic anhydride on polyethylene. I. Mechanism of grafting in the presence of oxygen // *Journal of Polymer Science Part A*. 1967. V. 5. P. 795–806.
8. Ashori A. Wood-plastic composites based on polyethylene and wood flour // *BioResources*. 2020. V. 15, N 2. P. 4321–4335.
9. Ершов Ю.А., Майорова Т.Н., Саркисов В.И. Химия полимеров: учебник для вузов. М.: Химия, 2021. 480 с.
10. Ragaert K., Delva L., Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste // *Waste Management*. 2017. V. 69. P. 24–58.

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 541.64:542.952

Разработка органоглинистых модификаторов для полимерных нанокомпозитов с заданными свойствами

Зера Лионовна Бесланеева¹, Алим Мухарбиевич Хутов², Лиана Олеговна Иругова³, Алина Мухамедовна Иругова⁴, Эльмира Жебировна Хасмегова⁵, Дисана Артуровна Кярова⁶, Танзиля Ахматовна Тюбеева⁷

^{1,2,3,4,5,6} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

⁷ МКОУ «Гимназия № 1» г. о. Нальчик, Нальчик, Россия

¹ zera-beslaneeva@mail.ru

² alimkah@mail.ru

³ liana077077@icloud.com

⁴ fffffuuti@gmail.com

⁵ madinaalieva01010@gmail.com

⁶ disanakyarova2005@icloud.com

⁷ t-tanzi2014@ya.ru

Аннотация. Рассмотрены методы органоимодификации базальных поверхностей кальций- и натрий-монтмориллонитов путем обработки акрилатом и метакрилатом гуанидина. Проведено исследование влияния химической структуры выбранного органоимодификатора на физико-химические и эксплуатационные свойства полиолефинового нанокомпозита на основе полиэтилена низкого давления. Установлено, что изменение молекулярной структуры органоимодифицированного слоя монтмориллонита существенно влияет на показатели прочности, жесткости и эластичности конечного материала. Полученные результаты открывают перспективы целенаправленного управления свойствами полимерных композитов, позволяя создавать материалы с заданными характеристиками для специализированных применений.

Ключевые слова: полимерный нанокомпозит, акрилат гуанидина, метакрилат гуанидина, полиэтилен, органоимодификатор

Для цитирования: Бесланеева З.Л., Хутов А.М., Иругова Л.О., Иругова А.М., Хасмегова Э.Ж., Кярова Д.А., Тюбеева Т.А. Разработка органоглинистых модификаторов для полимерных нанокомпозитов с заданными свойствами // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 53–56.

CHEMISTRY

Original article

Development of organic clay modifiers for polymer nanocomposites with specified properties

Zera L. Beslaneeva¹, Alim M. Khutov², Liana O. Irugova³, Alina M. Irugova⁴, Elmira Zh. Khasmegova⁵, Disana A. Kyarova⁶, Tanzilya A. Tyubeeva⁷

^{1,2,3,4,5,6} Kabardino-Balkarian State University, Nal'chik, Russia

⁷ MEI "Gymnasium No. 1" of the Nalchik Urban District, Nal'chik, Russia

¹ zera-beslaneeva@mail.ru

² alimkah@mail.ru

³ liana077077@icloud.com

⁴ fffffuuti@gmail.com

⁵ madinaalieva01010@gmail.com

⁶ disanakyarova2005@icloud.com

⁷ t-tanzi2014@ya.ru

Abstract. The methods of organomodification of the basal surfaces of calcium and sodium montmorillonites by treatment with acrylate and guanidine methacrylate are considered. The influence of the chemical structure of the selected organomodifier on the physical, chemical, and operational properties of a polyolefin nanocomposite based on low-pressure polyethylene is investigated. It is established that changes in the molecular structure of the organomodified montmorillonite layer significantly affect the strength, rigidity, and elasticity of the final material. The results obtained open up prospects for the purposeful control of the properties of polymer composites, allowing the creation of materials with specified characteristics for specialized applications.

Keywords: polymer nanocomposite, guanidine acrylate, guanidine methacrylate, polyethylene, organomodifier

For citation: Beslaneeva Z.L., Khutov A.M., Irugova L.O., Irugova A.M., Khasmegova E.Zh., Kyarova D.A., Tyubeeva T.A. Development of Organoglass Modifiers for Polymer Nanocomposites with Predetermined Properties // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):53–56.

Введение

Современные требования к полимерным материалам, используемым в промышленности, медицине, производстве упаковки и строительстве, диктуют необходимость баланса между прочностью, жёсткостью и термостойкостью при одновременном снижении массы и стоимости изделий [1–5]. Одним из наиболее эффективных подходов к решению этой задачи является создание полимерных нанокompозитов, в которых наноразмерные неорганические наполнители служат для усиления матрицы и придания ей новых функциональных свойств.

Особое место среди наполнителей занимают слоистые алюмосиликаты, в первую очередь монтмориллониты, благодаря их высокой удельной поверхности, ионообменной ёмкости и способности к интеркаляции органических молекул. Однако природные формы монтмориллонита (например, Са- и Na-формы) являются гидрофильными и плохо совместимы с гидрофобными полимерными матрицами, такими как полиолефины. Для преодоления этого ограничения применяется органомодификация – замена обменных катионов в межслоевом пространстве глины на органические катионы, что приводит к формированию органоглинистых систем с повышенной совместимостью с полимером и увеличенным межслоевым расстоянием.

Выбор структуры органомодификатора играет ключевую роль в определении конечных свойств нанокompозита. В последние годы активно исследуются модификаторы на основе функциональных соединений, таких как производные гуанидина, обладающие высокой реакционной способностью, термической стабильностью и способностью к дополнительным взаимодействиям с полимерной матрицей. В частности, акрилат и метакрилат гуанидина представляют интерес как бифункциональные реагенты, сочетающие ионную часть для обмена с глиной и полимеризуемую группу для потенциального химического связывания с матрицей [6, 7].

Экспериментальная часть

Настоящая работа посвящена разработке органоглинистых модификаторов на основе Са- и Na-форм монтмориллонита с использованием акрилата и метакрилата гуанидина, а также исследованию влияния различий в их молекулярной структуре на физико-механические свойства нанокompозитов на основе полиэтилена низкого давления (ПЭНД). Целью исследования является установление взаимосвязи между химическим строением органомодификатора, степенью интеркаляции/экспандирования глинистого наполнителя и эксплуатационными характеристиками конечного материала. Полученные результаты позволяют перейти от эмпирического подбора компонентов к целенаправленному проектированию полимерных нанокompозитов с заранее заданными и настраиваемыми свойствами.

В работе изучены особенности органомодификации базальных поверхностей Са- и Na-форм монтмориллонита акрилатом и метакрилатом гуанидина и влияние природы органомодификатора на свойства полимерного нанокompозита на основе полиэтилена низкого давления.

Для исследования были подготовлены натриевая (Na) и кальциевая (Ca) формы монтмориллонита. Исходным сырьем послужила природная глина из месторождения Герпетез (Россия, Кабардино-Балкарская республика), а методика подготовки описана в работе [8]. Акрилат и метакрилат гуанидина (АГ и МАГ) были синтезированы согласно процедурам, изложенным в публикациях [9, 10].

Процесс получения органоглины включал добавление органических солей в водную суспензию бентонита. Количество добавленных солей составляло 10 % от массы сухой глины. Смесь перемешивали в течение 4 часов. После этого осадок отделяли с помощью центрифугирования, тщательно промывали дистиллированной водой и высушивали при комнатной температуре. В качестве полимерной матрицы для создания нанокompозитов был выбран промышленный полиэтилен низкого давления. Нанокompозиты были получены путем

смещения расплава полиолефина и органоглины в соотношении 3–7 % органоглины от общей массы полиэтилена. Этот процесс осуществлялся на двухшнековом экструдере при температуре 190 °С.

ИК-спектроскопия показала, что акрилат и метакрилат гуанидина, адсорбированные на монтмориллоните в натриевой и кальциевой формах, ведут себя по-разному. Разница объясняется тем, что обменные катионы (Na^+ и Ca^{2+}) влияют на прочность и способ связывания молекул с поверхностью минерала. В случае натриевой формы монтмориллонита, молекулы не образуют связей с поверхностными атомами кислорода. Напротив, с кальциевой формой монтмориллонита, молекулы гуанидинсодержащих солей взаимодействуют как с обменными катионами, так и с поверхностными атомами кислорода (через водородные связи), а также с соседними адсорбированными молекулами. Ранее проведенные исследования методом сканирующей зондовой микроскопии показали, что плоская ориентация молекул в межслоевых пространствах способствует их одновременному взаимодействию с катионами и атомами кислорода [11].

В ходе исследования механических характеристик нанокomпозиционных материалов на основе полиэтилена, содержащих 3–7 % органо-модифицированного монтмориллонита, была установлена корреляционная зависимость между природой органо-модификатора монтмориллонита и свойствами полученных нанокomпозитов. Было установлено, что модуль упругости нанокomпозитов превосходит таковой для ненаполненного полиэтилена, причем данный эффект более выражен при использовании акрилата гуанидина в качестве органо-модификатора (см. рисунок 1). При этом наблюдается лишь незначительное снижение прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве.

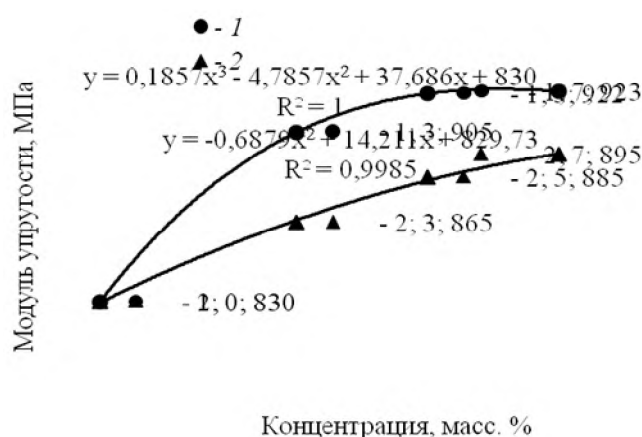


Рисунок 1 – Зависимость модуля упругости нанокomпозитов от состава содержания органоглины: 1 – органоглина с АГ; 2 – органоглина с МАГ

Различия в характере влияния монтмориллонита, модифицированного акрилатом и метакрилатом гуанидина, на механические свойства полиэтилена могут быть объяснены более высоким сродством этиленовых фрагментов акрилата гуанидина к макромолекуле полиэтилена, что приводит к формированию более высокого уровня адгезионного взаимодействия между компонентами.

Как видно из рисунка 2, прочностные свойства полиэтилена (ПЭ) демонстрируют экстремальную зависимость от типа и концентрации органоглины. Примечательно, что введение всего 3 масс. % органоглины, модифицированной акрилатом гуанидина (АГ), приводит к существенному увеличению ударной вязкости.



Рисунок 2 – Зависимость ударной вязкости нанокomпозитов от состава содержания органоглины: 1 – органоглина с АГ; 2 – органоглина с МАГ

В то же время аналогичное количество монтмориллонита, модифицированного метакрилатом гуанидина (МАГ), не оказывает заметного влияния на этот показатель. Этот феномен объясняется тем, что эффективное расслоение кристаллитов монтмориллонита до элементарных пакетов или монослоев значительно увеличивает их анизодиаметрию. Это, согласно литературным данным [12], способствует улучшению механических характеристик композита. Очевидно, что способность органомодифицированного слоистого силиката равномерно распределяться в полимерной матрице на наномерном уровне (пороговая концентрация) также определяется природой самого органомодификатора. Дальнейшее увеличение содержания органоглины приводит к снижению прочностных показателей, что связано с ограничением подвижности макромолекул полимера из-за их взаимодействия с обширной поверхностью наполнителя.

Таким образом, эффективность органомодификаторов монтмориллонита в модификации структуры и свойств полиэтилена напрямую зависит от их химического строения и сродства к полимеру. Наши экспериментальные данные опровергают устоявшееся представление о том, что для достижения наилучших механических свойств слоистосиликатных нанокомпозитов необходимы органомодификаторы с длинными алифатическими цепями. Напротив, акрилат и метакрилат гуанидина показали себя как весьма эффективные модификаторы базальных поверхностей монтмориллонита в проведенных исследованиях. Для успешного создания нанокомпозитов с высокими эксплуатационными характеристиками необходимо продолжать систематическое изучение всех факторов, влияющих на формирование их структуры.

Библиография

1. Polymer-Clay-Nanocomposites / Ed. Pinnavaia T.J., Beall G. New York: Wiley, 2000. 370 p.
2. Polymer Nanocomposites: Synthesis, Characterization, and Modeling ACS Symp. Ser. 804 / Ed. By Krishnamoorti R., Vaia R.A. Washington. DC.: Am. Chem. Soc., 2001. 256 p.
3. Alexander M., Dubois P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials // Mater. Sci. Eng. 2000. V. 28. P. 1–63.
4. Ray S.S., Okamoto M. Polymer. Layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing // Prog. Polym. Sci. 2003. V. 28. P. 1539.
5. Ломакин С.М., Заиков Г.Е. Полимерные нанокомпозиты пониженной горючести на основе слоистых силикатов // Высокомолек. соед. Б. 2005. Т. 47, № 1. С. 104–120.
6. Тарасевич Ю.И., Овчаренко Ф.Д. Адсорбция на глинистых минералах. Киев: Наукова думка, 1975. 351 с.
7. Lagaly G. Interaction of alkylamines with different types of layered compounds // Solid State Ionics. 1986. V. 22. P. 43.
8. Patent USA № 6050509 Method of manufacturing polymer-grade clay for use in nanocomposites / M. Clarey, J. Edwards, S.J. Tsipursky, G.W. Beall, D.D. Eisenhour. 2001.
9. Сивов Н.А., Мартыненко А.И., Кабанова Е.Ю., Попова Н.И., Хаширова С.Ю., Эсмурзиев А.М. Радикальная гомо(со)полимеризация акрилат- и метакрилатгуанидинов в водных средах // Нефтехимия. 2004. № 3. С. 74–75.
10. Лигидов М.Х., Малкандуев Ю.А. Мирзоев Р.С., Пахомов С.И., Хаширова С.Ю., Шетов Р.А. Ультрафильтрационное концентрирование молибдена (VI) с применением гуанидинсодержащего водорастворимого полимера // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. 2008. Т. 51, № 10. С. 108–112.
11. Хаширова С.Ю., Мусаев Ю.И., Малкандуев Ю.А., Лигидов М.Х., Мусаева Э.Б. Сивов Н. А. Микитев А.К. Новые гибридные нанокомпозиты на основе слоистых алюмосиликатов и ионогенных мономер/полимерных акрилат- и метакрилатгуанидинов // Нанотехника. 2009. № 3 (19). С. 58–66.
12. Герасин В.А., Бахов Ф.Н., Меркалова Н.Д., Королев Ю.М., Fischer H.R., Антипов Е.М. Структура формирующихся на Na⁺-монтмориллоните слоев поверхностно-активных веществ и совместимость модифицированной глины с полиолефинами // Высокомолек. соед. А. 2005. Т. 47, № 9. С. 1635–1651.

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 691.175.3

**Влияние режимов фрезерования на усталостную прочность
модифицированных углепластиков при критических условиях эксплуатации**

Игорь Сергеевич Болотников¹, Екатерина Александровна Косенко², Наталья Ивановна Баурова³

¹ЗАО «Универсал-Аэро», Москва, Россия

^{1,2,3}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Игорь Сергеевич Болотников, igor_bolotnikov@rambler.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований по оценке влияния режимов фрезерования углепластиков, в том числе с матрицами, модифицированными диметакрилатом триэтиленгликоля и силоксановым винилсодержащим каучуком с платиновым катализатором, на изменение их статической и циклической прочности при изгибном нагружении после выдержки в условиях низких отрицательных температур (–50 °С), высокой влажности и солевого тумана.

Ключевые слова: водяная пыль, низкая отрицательная температура, полимерные композиционные материалы, солевой туман, циклический изгиб

Для цитирования: Болотников И.С., Косенко Е.А., Баурова Н.И. Влияние режимов фрезерования на усталостную прочность модифицированных углепластиков при критических условиях эксплуатации // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 57–61.

CHEMISTRY

Original article

**Influence of milling modes on the fatigue strength of modified
carbon fiber reinforced plastics under critical operating conditions**

Igor S. Bolotnikov¹, Ekaterina A. Kosenko², Natalya I. Baurova³

¹CJSC «Universal-Aero», Moscow, Russia

^{1,2,3}Moscow automobile and road construction state technical university (MADI), Moscow, Russia

Corresponding author: Igor S. Bolotnikov, igor_bolotnikov@rambler.ru

Abstract. The results of studies assessing the influence of milling modes of carbon fiber reinforced plastics, including those with matrices modified with triethylene glycol dimethacrylate and siloxane vinyl-containing rubber with a platinum catalyst, on changes in their static and cyclic strength under flexural loading after exposure to conditions of low negative temperatures (–50 °C), high humidity and salt fog are presented.

Keywords: water spray, low negative temperature, polymer composite materials, salt fog, cyclic bending

For citation: Bolotnikov I.S., Kosenko E.A., Baurova N.I. Influence of milling modes on the fatigue strength of modified carbon composites under critical operating conditions // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):57–61.

Введение

В условиях стремительного развития технологий производства и увеличения требований к конструкционным материалам наблюдается неуклонный рост объема и номенклатуры изделий, изготовленных из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Являясь высокотехнологичными материалами, ПКМ позволяют создавать детали и конструкции с заданным комплексом свойств, адаптированным под различные условия эксплуатации. Это обуславливает их высокую востребованность в машиностроении, автомобилестроении, авиации и ракетно-космической отрасли.

Современный уровень разработок и исследований в области композитного материаловедения позволяет успешно расширять функциональные свойства ПКМ для их использования в производстве высоконагруженных, термостойких и ударопрочных конструкций, а также изделий, обладающих высокой

износостойкостью и устойчивостью к агрессивным средам и другим неблагоприятным факторам эксплуатации [1–3].

В настоящее время в условиях освоения арктической зоны актуальной научно-практической задачей является создание композитных деталей и конструкций, работающих в условиях морского климата, высокой влажности и низких отрицательных температурах.

Решение данной задачи, как правило, осуществляется путем разработки новых составов и структур ПКМ с применением методов модификации материалов матрицы и создания гибридных армирующих материалов. Однако долговечность композитных изделий определяется не только компонентами ПКМ, технологией и режимами формования, но и качеством постформовочной обработки [4, 5], которую выполняют различными методами, среди которых наиболее универсальными и широко распространенными являются методы механической обработки: фрезерование, точение, сверление и др.

При выполнении механической обработки, в частности, фрезерования изделий, изготовленных из ПКМ, основным технологическим режимом, от которого зависит производительность технологического процесса, является скорость подачи рабочего инструмента (s). При этом увеличение скорости подачи режущего инструмента без регулирования другого показателя режима резания – частоты вращения фрезы (n) – неизбежно приведет к увеличению составляющих сил резания, негативному воздействию вибраций и ударных нагрузок, что, в свою очередь, вызовет образование таких технологических дефектов как расслоение, вырывание волокон, термическая деструкция, выкрашивание матрицы и пр. [6–9]. Поэтому при поиске оптимальных режимов фрезерования изделий из ПКМ должна осуществляться вариация частоты вращения фрезы и скорости ее подачи.

Целью работы является обеспечение долговечности композитных деталей в критических условиях эксплуатации за счет обоснования выбора режимов их механической обработки с учетом влияния пластифицирующих матрицу добавок.

Материалы и технология получения образцов

Для выполнения экспериментальных исследований были изготовлены листы углепластика. Листы углепластика формовались методом вакуумной инфузии из 4-х слоев углеродной ткани саржевого плетения (артикул УТ-3К-Т240) с использованием эпоксидной смолы на основе бисфенол – А марки 810-И с циклоалифатическим отвердителем двойного отверждения. В качестве пластифицирующих добавок эпоксидной матрицы использовались диметакрилат триэтиленгликоля и двухкомпонентный силиконовый эластомер (силоксановый винилсодержащий каучук с платиновым катализатором). Их выводили путем механического перемешивания при комнатной температуре вводились в количестве 3 масс. ч на 100 масс. ч. связующего.

Отверждение образцов осуществлялось в вакуумном мешке при комнатной температуре в течение 24 ч с последующим постотверждением в термошкафу при ступенчатом нагреве от 35 до 80 °С в течение 8 ч.

Штучные образцы с габаритными размерами 100×15×1,2 мм были получены фрезерованием рашпильной фрезой из твердосплавного материала марки АСТ 417 диаметром 4 мм с использованием двух сравниваемых режимов:

- 1 режим: $s=100$ мм/мин и $n=5$ тыс. об/мин;
- 2 режим: $s=200$ мм/мин и $n=10$ тыс. об/мин.

Методика выполнения исследований

Для оценки влияния режимов фрезерования на усталостную прочность углепластиков использовалась авторская методика, на которую получен патент (Патент РФ № 2810964). Методика испытаний заключается в блочном циклическом изгибном нагружении образцов ПКМ прямоугольного сечения с заданной равной частотой и амплитудой. После реализации каждого блока циклического нагружения (5 тыс. циклов) выполнялось измерение статической прочности на заданную величину прогиба, равную величине амплитуды циклического нагружения. Такой подход позволил получить информацию о возникающей в процессе циклического нагружения локальной релаксации напряжений и интенсивности накопления поврежденности в матрице испытываемых образцов.

Определение статической прочности образцов при трехточечном изгибе выполнялось на машине «УТС 110М-50» (скорость нагружения 10 мм/мин, расстояние между опорами 80 мм).

Циклическое изгибное нагружение проводили на запатентованной установке (Патент РФ № 2788917) [10] с частотой 5 Гц и амплитудой, равной 14 мм (9 мм для серий образцов, выдержанных в условиях водяной пыли и солевого тумана), которая составила 80 % от средней величины максимально-го прогиба всех серий исследуемых образцов. Циклическое нагружение осуществлялось до разрушения

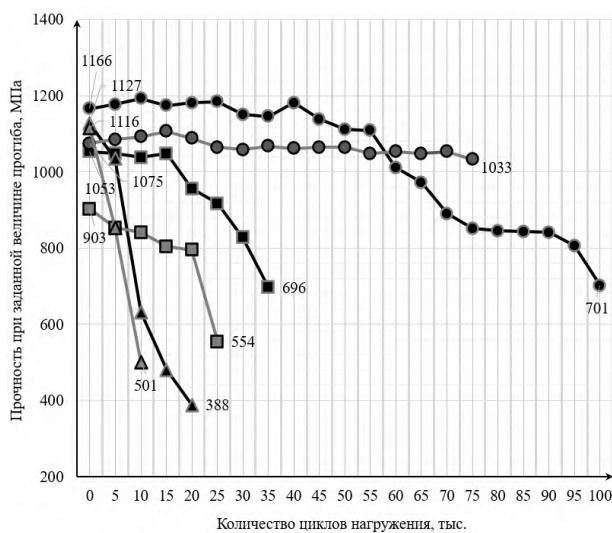
образцов или до достижения 100 тыс. циклов нагружения с последующим испытанием по определению остаточной прочности при изгибе.

Для оценки влияния критических условий эксплуатации анализировалось изменение прочностных характеристик после циклов воздействия: низкой температуры ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 60 ч, камера КНМ-64S Komeg), водяной пыли и солевого тумана (48 ч, камера КМ-F-60С).

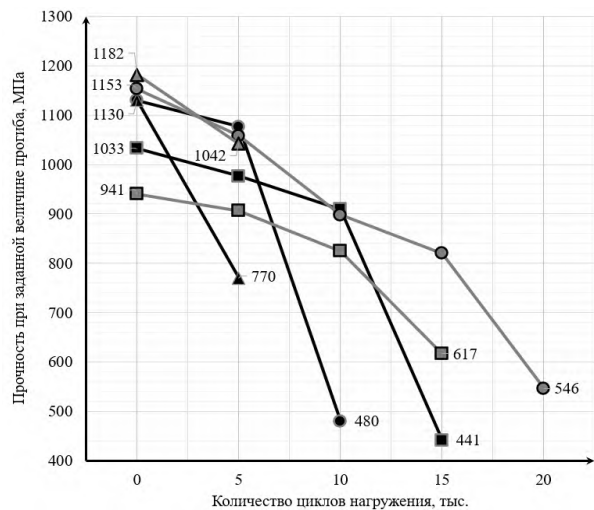
Результаты и обсуждение

По результатам испытаний были получены графики зависимости изменения усталостной прочности серий образцов, полученных с использованием двух сравниваемых режимов фрезерования после выдержки в условиях, характеризующих критические условия эксплуатации (рисунк 1).

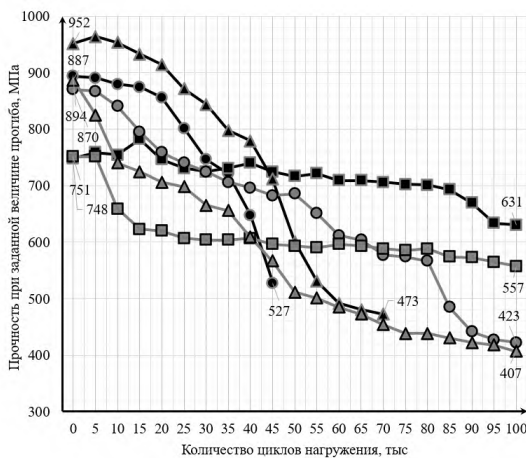
В условиях отсутствия влияния факторов, характеризующих критические условия эксплуатации, наибольшей усталостной прочностью обладают образцы углепластиков без модификаторов в составе матрицы, полученные фрезерованием на 1 режима обработки (рисунк 1а). Данные образцы выдерживают 100 тыс. циклов нагружения с потерей 42 % прочности после циклического нагружения. Образцы углепластиков, полученные фрезерованием с использованием 2 режима обработки, выдерживают 75 тыс. циклов с потерей 11 % прочности после циклического нагружения (таблица 1).



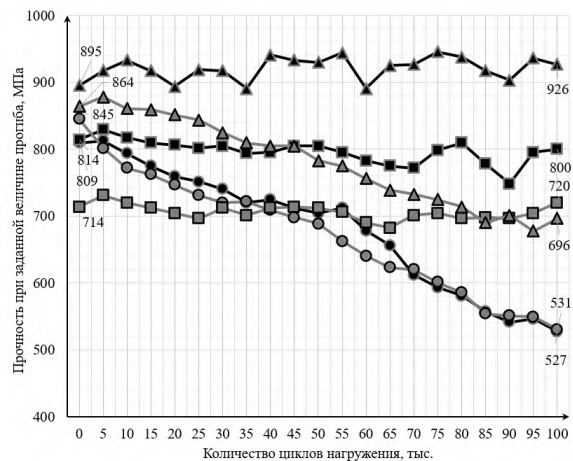
а)



б)



в)



г)

- 5/100 без модификаторов
- 5/100 с диметакрилатом триэтиленгликоля
- ▲— 5/100 с силиконовым эластомером
- 10/200 без модификаторов
- 10/200 с диметакрилатом триэтиленгликолем
- △— 10/200 с силиконовым эластомером

Примечание: через дробь указаны частота вращения фрезы, тыс. об/мин / скорость подачи фрезы, мм/мин

Рисунок 1 – Зависимости изменения прочности образцов углепластика при изгибе на заданную величину от числа циклов нагружения (а), после выдержки при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б), в условиях водяной пыли (в), в условиях солевого тумана (г)

Таблица 1 – Прочность образцов углепластиков до и после циклического нагружения

Тип модификатора	Показатели прочности при статическом трехточечном изгибе			
	Средняя прочность при изгибе до циклического нагружения, МПа	Остаточная прочность при изгибе, мм	Средняя прочность при изгибе до циклического нагружения, МПа	Остаточная прочность при изгибе, мм
	Режимы фрезерования, n [тыс. об/мин] / s [мм/мин]			
	5/100		10/200	
Без влияния климатических факторов				
Без модификатора	1215	706	1165	1033*
Диметакрилат триэтиленгликоля	1110	696*	1008	554*
Силиконовый эластомер	1215	338*	1250	501*
При влиянии низкой отрицательной температуры –50 °С				
Без модификатора	1152	480*	1144	546*
Диметакрилат триэтиленгликоля	1107	441*	1034	617*
Силиконовый эластомер	1169	770*	1262	1042*
При влиянии водяной пыли				
Без модификатора	974	527*	917	412
Диметакрилат триэтиленгликоля	766	631	833	588
Силиконовый эластомер	977	473*	1009	430
При влиянии солевого тумана				
Без модификатора	947	543	821	554
С диметакрилатом триэтиленгликоля	927	948	912	870
Силиконовый эластомер	1058	1146	1082	829

Примечание: *значения остаточной прочности образцов, не выдержавших полного числа циклов нагружения (см. рисунок 1).

Снижение усталостной прочности модифицированных образцов может быть связано с тем, что введение силиконового эластомера в состав матрицы повышает плотность материала. Это, в свою очередь, способствует снижению величины максимального прогиба и зоны упругой деформации. Снижение прочности у образцов, содержащих в качестве модифицирующей добавки диметакрилата триэтиленгликоля, может быть обусловлено снижением адгезионной и межслойной прочности.

При этом использование в качестве модифицирующей добавки силиконового эластомера позволяет получить наибольшую статическую прочность при изгибе после выдержки во всех исследуемых условиях. Среднее значение прочности данных образцов увеличивается при обработке на режимах с более высокими показателями (таблица 1).

При переходе в область действия отрицательных температур, а также после выдержки в условиях водяной пыли и солевого тумана, у всех серий образцов наблюдается снижение среднего значения прочности при изгибе (таблица 1).

Воздействие отрицательной температуры оказывает существенное влияние на снижение усталостной прочности. После выдержки при температуре –50 °С наибольшее количество циклов (20 тыс.), которое образец выдерживает до разрушения наблюдается у образцов углепластиков, не содержащих модификаторы в составе матрицы и полученных фрезерованием с использованием 2 режима обработки (рисунок 1б). При этом у всех исследуемых типов образцов значение остаточной прочности выше, а потеря прочности после циклического нагружения ниже, чем у углепластиков, полученных фрезерованием с использованием 1 режима обработки. Использование силиконового эластомера в качестве модификатора матрицы ПКМ существенно снижает усталостную прочность: количество циклов, которое образец выдер-

живает до разрушения составляет всего 5 тыс. При этом потеря прочности при фрезеровании на 1 и 2 режимах + составляет 34 и 17 % соответственно.

Выдержка в условиях водяной пыли и солевого тумана не привела к повышению жесткости образцов, выраженной через уменьшение величины максимального прогиба, что потребовало корректировки амплитуды циклического нагружения для данного типа образцов.

Использование в качестве модифицирующей добавки диметакрилата триэтиленгликоля и фрезерование данного типа образцов с применением 1 режима обработки позволяет обеспечить наибольшую усталостную прочность углепластиков после выдержки в условиях водяной пыли (*рисунок 1в* и *таблица 1*). Данные образцы выдерживают 100 тыс. циклов нагружения до разрушения, теряя при этом 17 % прочности.

Выдержка в солевом тумане не привела к потере прочности модифицированных углепластиков (режима обработки № 1) после завершения полного цикла нагружения на изгиб (см. *рисунок 1г*). При этом у образцов, содержащих в качестве модифицирующей добавки диметакрилат триэтиленгликоля и полученных фрезерованием на 2 режиме обработки, потеря прочности после циклического нагружения составила всего ~ 5 %.

Заключение

Выбор материала модификатора матрицы и режимов фрезерования ПКМ определяется оптимальным сочетанием значений их прочности при статическом и циклическом нагружении с учетом условий эксплуатации.

Библиография

1. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения // Вестник Российской академии наук. 2017. № 9. С. 827–839.
2. Евдокимов А.А., Петрова А.П., Павловский К.А. и др. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксивинилэфирного связующего // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). С. 128–136.
3. Федоров С.Ю., Тарабрина Т.Д., Нелюб В.А. Современные технологии придания углепластикам функциональных свойств // Химическая промышленность сегодня. 2023. № 5. С. 4–10.
4. Bolotnikov I.S., Kosenko E.A., Demin P.E. Influence of machining modes and negative temperature on the static bending strength of carbon fiber reinforced plastics // Polymer Science – Series D. 2023. V. 16, N 4. P. 1028–1033.
5. Bolotnikov I.S., Kosenko E.A. Influence of Milling Conditions and Negative Temperature on the Strength of Carbon Fiber Reinforced Polymer during Cyclic Bending Loading // Russian Metallurgy (Metally). 2024. V. 2024, N 7. P. 1648–1653.
6. Митясов, Л.В. Особенности обработки углепластика // Главный механик. 2018. № 6. С. 25–28.
7. Karatas M.A., Gokkaya H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials // Defence Technology. 2018. V. 14, N 4. P. 318–326.
8. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 6 (45). С. 106–118.
9. Рогов В.А., Тюкпиеков В.Н. Особенности обработки неметаллов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2000. № 3. С. 44–49.
10. Bolotnikov I.S. Development of a Testing Machine for Determining Fatigue Characteristics of Polymer Composite Materials under Cyclic Bending Loading // Steel in Translation. 2024. V. 54, N 11. P. 1068–1072.

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 536.2.022/541.11

**Исследование термических свойств смесей антипиренов
на основе полифосфата аммония, меламина и дипентаэритрита**

Тимур Аабдулович Борукаев¹, Лина Мартиновна Тохова², Эльдар Билялович Газаев³, Залина Ахмедовна Шорова⁴

^{1,2,3,4}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия
Автор, ответственный за переписку: Тимур Аабдулович Борукаев, boruk-chemacal@mail.ru

Аннотация. Исследовано термическое поведение полифосфата аммония, меламина, дипентаэритрита и смесей на их основе при различном соотношении компонентов. Обнаружена зависимость термических свойств смесей полифосфат аммония/меламин/дипентаэритрит от соотношения компонентов в системе. Установлено оптимальное соотношение компонентов в системе полифосфат аммония/меламин/дипентаэритрит, при котором деструктивные процессы начинают проявляться при более высоких значениях температуры.

Ключевые слова: полифосфат аммония, меламин, дипентаэритрит, смесь, термические свойства

Для цитирования: Борукаев Т.А., Тохова Л.М., Газаев Э.Б., Шорова З.А. Исследование термических свойств смесей антипиренов на основе полифосфата аммония, меламина и дипентаэритрита // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 62–66.

CHEMISTRY

Original article

**Study of thermal properties of mixtures of fire retardants based
on ammonium polyphosphate, melamine and dipentaerythritol**

Timur A. Borukaev¹, Lina M. Tokhova², Eldar B. Gazaev³, Zalina A. Shorova⁴

^{1,2,3,4}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia
Corresponding author: Timur A. Borukaev. boruk-chemical@mail.ru

Abstract. The thermal behavior of ammonium polyphosphate, melamine, dipentaerythritol and mixtures based on them was studied at different component ratios. The thermal properties of ammonium polyphosphate/melamine/dipentaerythritol mixtures were found to depend on the ratio of their components. An optimal ratio of ammonium polyphosphate/melamine/dipentaerythritol components was established, at which destructive processes begin to manifest themselves at higher temperatures.

Keywords: ammonium polyphosphate, melamine, dipentaerythritol, mixture, thermal properties

For citation: Borukaev T.A., Tokhova L.M., Gazaev E.B., Shorova Z.A. Study of the Thermal Properties of Flame Retardant Mixtures Based on Ammonium Polyphosphate, Melamine, and Dipentaerythritol // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):62–66.

Обеспечение пожарной безопасности полимерных материалов является одной из наиболее актуальных задач современной промышленности, так как полимерные материалы находят широкое применение в строительстве, транспорте, электронике и т. д. [1, 2]. Высокая горючесть многих полимерных материалов требует использования эффективных антипиренов, способных замедлять или предотвращать распространение пламени [3]. В связи с растущими экологическими требованиями и опасениями,

связанными с токсичностью галогенсодержащих антипиренов, наблюдается активное использование безгалогенных добавок и различных систем, в том числе интумесцентных [4, 5]. Эффективность интумесцентных антипиренов связана с тем, что защитное действие основано на сочетании нескольких механизмов. В частности, при термическом воздействии они образуют на материале вспученный коксовый слой. Образовавшийся слой пенококса, в дальнейшем выступает барьером, который препятствует диффузии кислорода к поверхностному слою материала, а также замедляет процессы выделения горючих продуктов пиролиза и теплопередач [6].

Основными составляющими таких систем антипиренов часто выступают: полифосфат аммония (ПФА), который действует как источник кислоты (фосфорной кислоты после разложения) и катализатор дегидратации полимера, способствуя карбонизации [7, 8]; меламин, являющийся источником азота, который при разложении выделяет негорючие газы (NH_3 , N_2), снижает температуру пламени и способствует образованию стабильного коксового остатка [9, 10], пентаэритрит (ПЭР) – полиол, который выступает в роли источника углерода, необходимого для формирования качественного и прочного коксового слоя [11, 12]. Эффективность таких систем находится в прямой зависимости от соотношения их компонентов. В связи с этим определение оптимального соотношения компонентов в антипирирующих системах является весьма важной и необходимой задачей.

Настоящая работа посвящена изучению термических свойств антипиренов (ПФА, МА, дипентаэритрита (ди-ПЭР) и их смесей. Для определения оптимального соотношения данных соединений в системе при создании высокоэффективных безгалогенных огнезащитных систем.

Экспериментальная часть

Для проведения исследований были выбраны антипирены, которые широко используются в огнестойких полимерных материалах в качестве интумесцентных огнезащитных добавок. В частности, в качестве кислотного источника и дегидратирующего агента был использован полифосфат аммония (ПФА) производства ООО «НОВОХИМ» (ТУ: 20.13.42.130-033-67017122-2019) с молекулярной формулой $(\text{NH}_4\text{PO}_3)_n$, где $n \geq 1000$. ПФА имел следующие характеристики: размер частиц, мкм – до 40; рН фильтрата 10 % суспензии – 5,0–7,0; температура разложения, °С – ≥ 250 ; растворимость в воде при 20 °С, г/100мл – $\leq 0,8$; содержание Р, % – 28–32.

В качестве газообразующего агента и источника азота использовали меламин (МА) производства ООО "НОВОХИМ" (ТУ: 20.13.62.190-036-67017122-2019). МА представлял собой порошок белого цвета, с содержанием влаги, % – $\leq 0,15$. Растворимость МА в воде при 20 °С, составляет 0,001 г/100 мл. Потеря веса при 350 °С (по ДСК) – 3 %; потеря веса 5 % при Т (по ДСК), °С – ≥ 360 °С. рН водной вытяжки 10 г/л – 5–6; размер частиц, мкм – ≤ 10 ; температура разложения, °С – ≥ 420 .

Углеродообразующим агентом (источник кокса) использовали ди-пентаэритрит (ди-ПЭР) $\text{O}[\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_3]_2$, производства EINECS № 204-104-9 (Китай), CAS № 115-77-5). Ди-ПЭР представлял собой белый порошок с размером частиц $d_{50} \leq 15$ мкм. Растворимость в воде – 0,22 г/100 мл. Температура плавления – 222 °С.

Все реагенты были использованы без дополнительной очистки.

В работе смеси ПФА/МА/ди-ПЭР готовили следующим образом. Необходимые количества ПФА, МА и ди-ПЭР (в соответствии с расчетными количествами массовых частей) были взвешены с точностью до 0,001 г. Затем взвешенные компоненты помещали в фарфоровую чашку и тщательно перетирали в течение 10 минут до получения максимально гомогенной порошкообразной смеси – ПФА/МА/ди-ПЭР.

Термогравиметрический анализ (ТГА) и дифференциально-термическую гравиметрию (ДТГ) образцов проводили на приборе PerkinElmer TGA 400. Анализ проводили на воздухе, навески образцов составляли $1 \pm 0,1$ мг, материал тигля керамический, нагревание осуществляли от 20 до 800 °С, скорость нагревания 2,5 град/мин. Все измерения проводились в одинаковых условиях.

Результаты и их обсуждение

Для полного понимания процессов термического разложения антипиренов и их поведения в полимерной матрице, а также для прогнозирования эффективности огнезащитных композиций, широко применяется термогравиметрический анализ (ТГА). ТГА позволяет количественно оценить изменение массы образца в зависимости от температуры, определить температурные интервалы разложения, ско-

рость деструкции и количество остаточного коксового продукта [13, 14]. Изучение кривых ТГА антипиренов, а также систем на их основе позволяет оценить возможность проявления синергетических или антагонистических свойств, что критически важно для разработки оптимальных составов огнестойких материалов [15].

В работе изучено термическое поведение исходных компонентов – ПФА, МА и ди-ПЭР, а также их смесей различного состава. Результаты ТГА и ДТГ представлены в *таблице 1*.

Таблица 1 – Составы систем ПФА/МА/ди-ПЭ

№ п/п	ПФА	МА	ди-ПЭР	Температура потери массы, °С				Макс. температура разложения, °С		
				2 %	5 %	10 %	50 %	1	2	3
1	1	0	0	290	334	378	658	340	368	662
2	0	1	0	266	285	300	341	331	–	–
3	0	0	1	252	297	318	373	373	–	–
4	1	2	1	233	257	272	422	281	343	–
5	1	2	2	218	251	267	413	280	401	–
6	1	2	3	234	257	272	406	284	399	–
7	1	1	1	234	254	267	421	271	319	379
8	1	1	2	239	258	273	400	286	387	>700
9	1	1	3	237	261	275	394	292	385	>700
10	2	1	1	236	257	274	393	284	385	–
11	2	1	2	227	250	268	439	272	332	375
12	2	1	3	219	250	270	421	282	378	–
13	2	3	1	121	230	270	471	118	131	317
14	2	3	2	234	258	273	452	276	396	710
15	2	3	3	235	257	271	426	279	399	–
16	3	1	1	233	256	290	400	–	–	–
17	3	1	2	226	253	270	479	264	356	596
18	3	1	3	236	257	272	400	–	–	–
19	3	2	1	236	253	279	496	257	355	586
20	3	2	2	232	256	272	428	–	–	–
21	3	2	3	228	250	267	447	291	–	–
22	3	3	1	234	254	280	448	275	392	658
23	3	3	2	235	258	273	452	276	374	677

Как показали исследования, ПФА проявляют термическую стабильность до 290 °С. Выше этой температуры ПФА начинает разлагаться. При этом термическое разложение ПФА происходит в несколько стадий. Так, активизация процессов разложения начинается выше 290 °С (2 %-ная потеря массы), а при температуре 334 °С происходит 5 %-ная потеря массы, а при 379 °С 10 %-ная потеря массы. Основные пики максимальной скорости разложения наблюдаются при 340 °С, 368 °С и наиболее интенсивный при 682 °С (–7,247 %/мин). Конечный коксовый остаток при 826 °С составляет 17 %. Эти наблюдения хорошо согласуются с данными, представленными Ненаховым и Пименовой [16], которые детально описывают многостадийный характер термического разложения ПФА.

В свою очередь, термическое разложение меламина происходит преимущественно через сублимацию и дальнейшую конденсацию продуктов. При этом МА обладает высокой термической стабильностью до ~330 °С. При повышении этой температуры МА начинает терять массу, и при 344 °С наблюдается потеря 5 % массы, а при температуре 359 °С потеря массы составляет 10 %. Основной пик максимальной скорости потери массы наблюдается при 360 °С (–35 %/мин). Практически разложение МА не сопровождается образованием коксового остатка. Так, при температуре 500 °С, коксовый остаток

после разложения МА составляет менее 1 %. Эти данные коррелируют с выводами, представленными в работе [17], где МА характеризуется как эффективное газообразующее соединение.

ТГА и ДТГ ди-ПЭР показывает термическую стабильность соединения до ~260 °С. Выше этой температуры ди-ПЭР начинает терять массу. В частности, 2 %-ная потеря массы наблюдается при температуре ~265 °С, а 5 % и 10 % потери массы наблюдаются при ~305 °С и ~327 °С соответственно. Исходя из термограммы ДТГ, разложение ди-ПЭР происходит в интервале температур 265–450 °С. При этом скорость разложения достигает максимума при температуре 377 °С (–16 %/мин). Практически полное разложение ди-ПЭР происходит в интервале 265–600 °С, т. е. остаток массы составляет менее 1 %. Сравнение температурных характеристик разложения пентаэритрита [18] и ди-ПЭР показывает, что последний проявляет более высокие термические свойства. Такое поведение ди-ПЭР очень важно, так как оно демонстрирует возможность приближения к температурным характеристикам (температуре разложения) ПФА.

Термический анализ смесей ПФА/МА/ди-ПЭР (см. таблицу 1) показал, что все смеси независимо от состава по значениям температур 2, 5 и 10 %-ной потери массы все составы уступают исходным компонентам. В частности, как показывают термограммы (например, до 400 °С), исходные антипирены ПФА, МА и ди-ПЭР обладают более высокой термической стабильностью (температура потери 2 % массы для ПФА составляет 290 °С, для меламина – 330 °С, для ди-ПЭР – 256 °С). При исследовании термических свойств смесей ПФА/МА/ди-ПЭР было установлено, что деструктивные процессы во всех составах, независимо от соотношения компонентов, начинаются в диапазоне 220–240 °С. Это заметно ниже, чем у исходных антипиренов. Причем термическое поведение смесей зависит от состава системы – ПФА/МА/ди-ПЭР. Так, среди приготовленных и исследованных систем ПФА/МА/ди-ПЭ (исследованы 17 составов) по значениям температуры 2 %-ной потери массы незначительно выделялись смеси: 1ПФА/1МА/2ди-ПЭР ($T_{2\%}=239$ °С), 1ПФА/1МА/3ди-ПЭР ($T_{2\%}=237$ °С) (цифры означают массовые части). Остальные составы – ПФА/МА/ди-ПЭР, в зависимости от соотношения компонентов, незначительно уступали по термостойкости вышеуказанным составам. В частности, смеси 2ПФА/1МА/1ди-ПЭР, 3ПФА/2МА/1ди-ПЭР, 3ПФА/1МА/3ди-ПЭР имели значение $T_{2\%}=235$ °С, а остальные системы 2 % потери массы наблюдали еще при менее низких значениях температуры. Такие низкие значения температур 2 %-ной потери массы смесей ПФА/МА/ди-ПЭР, в отличие от исходных соединений, связаны с взаимным влиянием компонентов в системе. Можно предположить, что ПФА как источник фосфорной кислоты способен инициировать процесс дегидратации ди-ПЭР при менее низких температурах, чем это происходит в отсутствие ПФА. Такая ранняя дегидратация ди-ПЭР может привести к ускоренному формированию углеродистых образований, которые в конечном итоге будут способствовать изменению огнестойкости материала.

Следует отметить, что состав системы ПФА/МА/ди-ПЭР влияет и на коксовый остаток смеси. Так, фактический остаток коксовых смесей при температуре 834 °С, составлял 15 % и выше. Причем остаток смесей сопоставим с остатком чистого ПФА (16 %), несмотря на наличие в составе смесей меламина и ди-ПЭР, которые при данных температурах разлагаются практически полностью, коксовый остаток смесей ПФА/МА/ди-ПЭР сопоставим с остатком чистого ПФА (16 %). Однако некоторое увеличение количества ди-ПЭР в смесях приводит к незначительному снижению коксового остатка, что показывает превалирование процессов газовой выделенной и деструкции над карбонизацией.

Таким образом, ТГА и ДТГ антипирирующих систем ПФА/МА/ди-ПЭР показал существенные различия в термической стабильности и способности к образованию коксового остатка между различными композициями. При этом данные смеси ПФА/МА/ди-ПЭР ниже, чем у исходных компонентов. Такое поведение смесей обусловлено взаимным влиянием составляющих системы друг на друга при повышенных температурах. Определено оптимальное соотношение компонентов в системе ПФА/МА/ди-ПЭР (2:3:2 соответственно), которое характеризуется более высокими значениями термических свойств и обладает максимальным коксовым остатком.

Библиография

1. Иванов П.П. Петров С.С. Современные полимерные материалы и их применение. М.: Химия, 2020. 256 с.
2. Smith J., Lee A. Polymer Applications in Modern Industries. New York: Springer, 2019. 300 p.

3. Сергеев В.А., Васильев Н.Н. Полимерные композиты с повышенной огнестойкостью. СПб.: Профессия, 2018. 180 с.
4. Weil E.D. Flame Retardants for Plastics and Textiles: Practical Applications. Boca Raton: CRC Press, 2008. 450 p.
5. Levchik S.V., Weil E.D. A Review of Phosphorus-Based Flame Retardants for Plastics // *Polymers for Advanced Technologies*. 2009. V. 20, N 5. P. 501–510.
6. Horn R.W. Ammonium Polyphosphate Flame Retardants // *Fire and Materials*. 1994. V. 18, N 3. P. 193–200.
7. Zhang L., Wu K. Preparation and Flame Retardancy of Ammonium Polyphosphate // *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. V. 132, N 40. P. 42689.
8. Hu Y., Wilkie C.A. Phosphorus-Based Flame Retardants // *Handbook of Fire Retardant Coatings and Foams*. 2011. P. 65–115.
9. Wang Z., Yuan Z., Wu K. Ammonium Polyphosphate as a Flame Retardant for Polypropylene: Synergistic Effects of Nanoclays // *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. V. 131, N 9. P. 40123.
10. Scharfel B. Flame Retardancy of Polymeric Materials. Weinheim: Wiley-VCH, 2010. 500 p.
11. Gan S.Y., Li L.S. Novel Intumescent Flame Retardants Based on Pentaerythritol Derivatives // *Journal of Materials Chemistry*. 2010. V. 20, N 15. P. 3135–3142.
12. Li L.S., Gan S.Y. Intumescent Flame Retardant System for Polyolefin's // *Polymer Degradation and Stability*. 2011. V. 96, N 6. P. 1070–1078.
13. Vyazovkin V. Thermal Analysis of Polymers. New York: CRC Press, 2016. 350 p.
14. Brown M.E. Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications. Dordrecht: Springer, 2001. 300 p.
15. Song L., Hu Y. Synergistic Flame Retardancy of Polymeric Materials // *Polymer Science*. 2017. V. 59, N 3. P. 250–265.
16. Ненахов С.А., Пименова В.П. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония // *Пожаровзрывоопасность*. 2010. Т. 19, № 8. С. 11–58.
17. Борукаев Т.А., Китиева Л.И., Кочкаров Ж.А. Горючесть и физико-механические свойства композитов на основе полиэтилена низкого давления и нековалентной добавки (меламин-циануровая кислота) // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2025. № 7. С. 2–9.
18. Labuschagne Fr. Metal catalysed intumescence of polyhydroxyl compounds. Doctoral Thesis. Pretoria: University of Pretoria, 2004. 22 p.

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 541.64

Исследование комплексообразующих свойств кватернизованных аммониевых солей

**Анета Ахмедовна Кокоева¹, Юсуф Ахматович Малкандуев², Марина Мухамедовна Шокарова³,
Мариям Хакимовна Каканаева⁴**

^{1,2,3,4} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

¹ al-aneta@mail.ru

² malkanduev@mail.ru

³ marinatohtamysheva465@gmail.com

⁴ markakanaeva@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты исследования комплексообразующих свойств катионного полиэлектролита – полидиметилдиаллиламмоний хлорида – по отношению к катионам меди (Cu^{2+}) и кобальта (Co^{2+}) в водных растворах. Определены оптимальные условия комплексообразования: длины волн максимального поглощения для комплексов ПДМДААХ с Cu^{2+} и Co^{2+} составили 715 нм и 560 нм соответственно. Установлено, что зависимость оптической плотности от концентрации реагента подчиняется закону Бугера, что свидетельствует о формировании устойчивых комплексов. Рассчитаны молярные коэффициенты поглощения.

Ключевые слова: четвертичные аммониевые соли, полидиметилдиаллиламмоний хлорид (ПДМДААХ), комплексообразование, ионы меди, ионы кобальта, спектрофотометрия, катионные полиэлектролиты

Для цитирования: Кокоева А.А., Малкандуев Ю.А., Шокарова М.М., Каканаева М.Х. Исследование комплексообразующих свойств кватернизованных аммониевых солей // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 67–72.

CHEMISTRY

Original article

Investigation of the mould-forming properties of quaternized ammonium salts

Aneta A. Kokoeva¹, Yusuf A. Malkanduev², Marina M. Shokarova³, Mariyam Kh. Kakanaeva⁴

^{1,2,3,4} Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹ al-aneta@mail.ru

² malkanduev@mail.ru

³ marinatohtamysheva465@gmail.com

⁴ markakanaeva@gmail.com

Abstract. The article presents the results of a study of the complexing properties of a cationic polyelectrolyte, polydimethyldiallylammonium chloride, in relation to copper (Cu^{2+}) and cobalt (Co^{2+}) cations in aqueous solutions. Optimal conditions for complexation have been determined: the maximum absorption wavelengths for PDMDAAX complexes with Cu^{2+} and Co^{2+} were 715 nm and 560 nm, respectively. It has been established that the dependence of the optical density on the concentration of the reagent obeys Bouguer's law, which indicates the formation of stable complexes. The molar absorption coefficients are calculated.

Keywords: quaternary ammonium salts, polydimethyldiallylammonium chloride (PDMDAAC), complexation, copper ions, cobalt ions, spectrophotometry, cationic polyelectrolytes

For citation: Kokoyeva A.A., Malkanduev Yu.A., Shokarova M.M., Kakanaeva M.Kh. Research of the Complex-Forming Properties of Quaternized Ammonium Salts // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):6–72.

Введение

Исследование комплексообразующих свойств кватернизированных аммониевых соединений представляет собой одну из актуальных задач современной физической и коллоидной химии, химии высокомолекулярных соединений и смежных областей. Данные соединения, характеризующиеся наличием положительно заряженного атома азота, связанного с четырьмя органическими заместителями, находят широкое применение в качестве катализаторов, поверхностно-активных веществ, антимикробных агентов, экстрагентов, флокулянтов и компонентов функциональных материалов [1, 2].

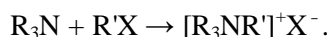
Особый интерес представляют водорастворимые катионные полиэлектролиты на основе четвертичных аммониевых солей, такие как полидиметилдиаллиламмоний хлорид (ПДМДААХ). Благодаря высокой плотности положительных зарядов на полимерной цепи и специфическим структурным особенностям (линейно-циклическое строение), ПДМДААХ способен к интенсивному электростатическому и координационному взаимодействию с различными анионами, молекулами и, что особенно важно, с катионами переходных металлов [3, 4]. Образование полиэлектролитных комплексов (ПЭК) «поликатион-ион металла» является основой для создания новых сорбционных материалов, систем контролируемой доставки веществ, каталитических систем и реагентов для очистки водных сред.

Механизмы кватернизации аминов, в частности классическая реакция Меншуткина, хорошо изучены [5, 6]. Однако исследования, направленные на детальное изучение закономерностей комплексообразования полученных полимеров с ионами металлов, особенно в водных средах, остаются востребованными. Понимание таких факторов, как стехиометрия взаимодействия, влияние рН, ионной силы, строения полимера и природы контра-иона на устойчивость и структуру образующихся комплексов, необходимо для целенаправленного синтеза материалов с заданными свойствами.

Цель работы – исследование комплексообразующей способности полидиметилдиаллиламмоний хлорида по отношению к ионам меди (II) и кобальта (II) в водных растворах с помощью спектрофотометрии. Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

1. Определение длин волн максимального поглощения (λ_{\max}) для индивидуальных компонентов и их комплексов.
2. Исследование зависимости оптической плотности от концентрации реагента при оптимальных λ_{\max} и постоянном значении рН.
3. Расчет молярных коэффициентов поглощения образующихся комплексов.
4. Оценка комплексообразующей способности ПДМДААХ на основе анализа спектрофотометрических данных.

Кватернизированные аммониевые соли представляют собой соединения общей формулы $[\text{NR}_4]^+\text{X}^-$, где R – органические радикалы (алкильные, арильные, алкенильные и др.), а X^- – анион (Cl^- , Br^- , I^- , OH^- и др.). Классическим методом их синтеза является реакция кватернизации (реакция Меншуткина) – взаимодействие третичного амина с алкилирующим агентом, чаще всего алкилгалогенидом [5]:



Реакция протекает по механизму нуклеофильного замещения $\text{S}_{\text{N}}2$ и сильно зависит от природы растворителя, нуклеофильности амина, уходящей способности галогенида и стерических факторов. Алкилиодиды проявляют наибольшую активность, затем следуют бромиды и хлориды. Полярные протонные растворители (спирты, вода) способствуют протеканию реакции [6, 7].

Четвертичные аммониевые катионы обладают высокой устойчивостью к действию многих нуклеофилов и щелочей, что позволяет выделять и использовать их соли даже с высокоактивными анионами (например, перманганатами, пентафтороксенатами) [8, 9]. Однако под действием сильных оснований они могут претерпевать различные перегруппировки (Соммеле – Хаузера, Стивенса) или элиминирование по Хофману [10, 11].

Полидиметилдиаллиламмоний хлорид (ПДМДААХ) – высокомолекулярный катионный полиэлектролит, получаемый циклополимеризацией диаллилдиметиламмоний хлорида. Его макромолекула имеет линейно-циклическую структуру с регулярно расположенными положительно заряженными четвертичными аммониевыми группами в основной цепи [12, 13]. Благодаря этому ПДМДААХ сочетает в себе свойства

типичного полиэлектролита (чувствительность к ионной силе, способность к набуханию) и поликатиона с высокой плотностью заряда. Он широко используется как катионный флокулянт и коагулянт в процессах очистки воды, в нефтедобыче для снижения фильтрации, в целлюлозно-бумажной промышленности, а также в составе косметических и гигиенических средств благодаря антимикробной активности [3, 14].

Взаимодействие катионных полиэлектролитов, таких как ПДМДААХ, с катионами металлов в водных растворах является нетривиальным процессом, поскольку прямому электростатическому отталкиванию противостоят специфические координационные взаимодействия. Ионы переходных металлов (Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} и др.) обладают выраженной способностью к комплексообразованию с различными лигандами, содержащими донорные атомы (O, N, S). Аммониевые группы ПДМДААХ формально не являются классическими координационными лигандами, однако могут участвовать во взаимодействиях за счет неспецифических сил (ион-дипольные, ван-дер-ваальсовы) или косвенно влиять на координацию молекул воды или контра-ионов, окружающих ион металла [15]. Более вероятным является формирование межполимерных или внутримономерных комплексов, где ион металла связывается с полианионом, а поликатион (ПДМДААХ) выполняет роль макросопутствующего иона или участвует в образовании тройного комплекса. В случае использования галогенидов металлов возможно образование смешанных галогенидных или оксогалогенидных комплексов, стабилизированных поликатионом.

Материалы и методы

В работе использовались следующие реактивы:

- полидиметилдиаллиламмоний хлорид (ПДМДААХ) – водный раствор с концентрацией ~20 %, очищенный диализом и лиофилизированный. Молекулярная масса ~200–300 кДа;
- хлорид меди(II) ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и хлорид кобальта(II) ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) марки «химически чистый» («х.ч.»);
- алкилдиметилбензиламмоний хлорид (Катамин АБ) – технический 50 %-ный водный раствор (ТУ 9392-003-48482528-99) в качестве референс-ПАВ для сравнительного анализа;
- вода бидистиллированная.

Все растворы готовились по точной навеске. Концентрации рабочих растворов ПДМДААХ, CuCl_2 и CoCl_2 варьировались в интервале 0,01–0,1 М.

Оптические измерения проводили на спектрофотометре СФ-3000 (или аналог) в кварцевых кюветках с толщиной поглощающего слоя 1 см. Температура контролировалась ($25 \pm 0,1$ °С).

Готовили серии водных растворов индивидуальных компонентов (ПДМДААХ, Cu^{2+} , Co^{2+}) и их смесей в различных мольных соотношениях ($R = [\text{ПДМДААХ}]/[\text{M}^{2+}]$ от 0,5 до 5,0). Значение рН растворов доводили до рН, характерного для стабильного комплекса (~5,5–6,0 для системы с Cu^{2+} и ~6,0–6,5 для Co^{2+}) с помощью микродобавок HCl или NaOH . Снимали спектры поглощения в диапазоне 350–800 нм. Длину волны, соответствующую максимуму поглощения для каждого комплекса, определяли графически и уточняли методом наименьших квадратов по аппроксимации пика.

При фиксированных λ_{max} и рН готовили серию растворов комплекса с постоянной концентрацией иона металла и возрастающей концентрацией ПДМДААХ (или наоборот). Измеряли оптическую плотность (D) и строили графики зависимости D от концентрации связывающего компонента. Молярный коэффициент поглощения (ϵ) для комплекса рассчитывали по формуле закона Бугера – Ламберта – Бера:

$$\epsilon = D / (C * l),$$

где C – концентрация комплекса (в первом приближении – концентрация иона металла, полностью связанного в комплекс), $l = 1$ см – толщина кюветы. Концентрацию образующегося комплекса оценивали из области насыщения на кривой $D = f(C)$.

ИК-спектры исходного ПДМДААХ и выделенных твердых комплексов с металлами регистрировали на Фурье-ИК спектрометре Perkin Elmer Spectrum One в области 4000–450 cm^{-1} методом прессования таблеток с КВг. Анализировали изменения полос поглощения, связанных с валентными и деформационными колебаниями групп $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2-$, $\text{C}-\text{N}^+$ и координационно связанных молекул воды.

Измерения показателя преломления жидких фаз в модельных трёхкомпонентных системах « H_2O – Катамин АБ – соль кальция» проводили на рефрактометре ИРФ-454Б при 25 °С для определения границ фазовых переходов изотермическим методом сечений [16, 17].

Результаты и их обсуждение

Результаты определения длин волн максимального поглощения представлены в *таблице 1*.

Таблица 1 – Длины волн максимального поглощения (λ_{\max}) для исследуемых растворов

Раствор	Концентрация, М	λ_{\max} , нм
ПДМДААХ	0,01	490
ПДМДААХ	0,1	490
Co ²⁺ (водн.)	0,01	490
Cu ²⁺ (водн.)	0,01	540
Комплекс ПДМДААХ с Co ²⁺	–	560
Комплекс ПДМДААХ с Cu ²⁺	–	715

Как видно из таблицы, индивидуальные растворы ПДМДААХ и аквакомплекса Co²⁺ не проявляют выраженных полос поглощения в видимой области, их λ_{\max} фиксируется на уровне 490 нм (вероятно, край полосы в УФ-области). Аквакомплекс меди [Cu(H₂O)₆]²⁺ имеет широкую полосу поглощения с максимумом около 810–820 нм, в наших условиях измеренный максимум при 540 нм может соответствовать частично гидролизованному или хлорокомплексам. Образование комплексов ПДМДААХ с ионами металлов приводит к значительному смещению полос поглощения (*рисунок 1*).

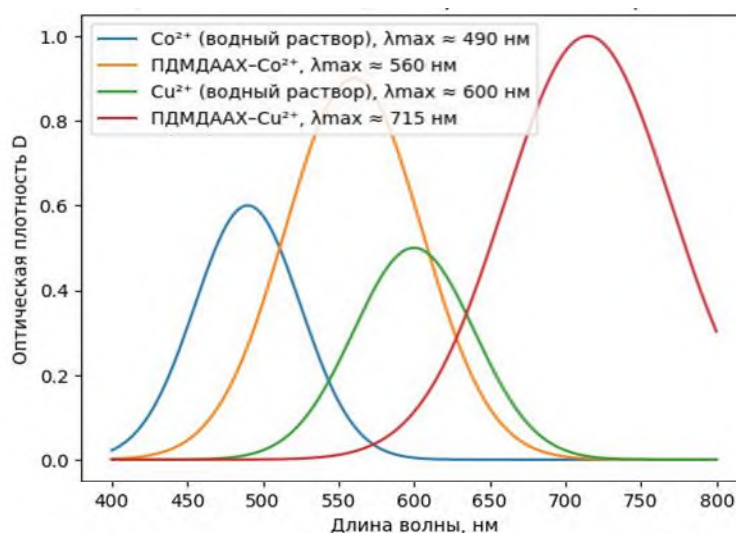


Рисунок 1 – Смещение полос поглощения при комплексообразовании

Для системы ПДМДААХ-Co²⁺ λ_{\max} смещается с 490 нм до 560 нм. Появление новой полосы поглощения указывает на изменение лигандного окружения иона кобальта, вероятно, вследствие замещения молекул воды в его первой координационной сфере лигандами более слабого поля, что приводит к снижению энергии расщепления d-орбиталей (Δ).

Для системы ПДМДААХ-Cu²⁺ наблюдается ещё более значительный сдвиг – до 715 нм. Это однозначно свидетельствует о сильном изменении стереохимии иона меди(II). В водном растворе он обычно находится в виде октаэдрического [Cu(H₂O)₆]²⁺. Взаимодействие с поликатионом может способствовать образованию тетрагонально-искажённых, квадратно-плоскостных или тетраэдрических комплексов, для которых характерны полосы поглощения в более длинноволновой области [18]. Наблюдаемый максимум при 715 нм типичен для дисторгированных октаэдрических или плоско-квадратных комплексов меди с азот- или кислородсодержащими лигандами.

Для выбранных λ_{\max} (560 нм для Co^{2+} и 715 нм для Cu^{2+}) была изучена зависимость оптической плотности (D) от концентрации ПДМДААХ при постоянной начальной концентрации иона металла и рН (рисунок 2).

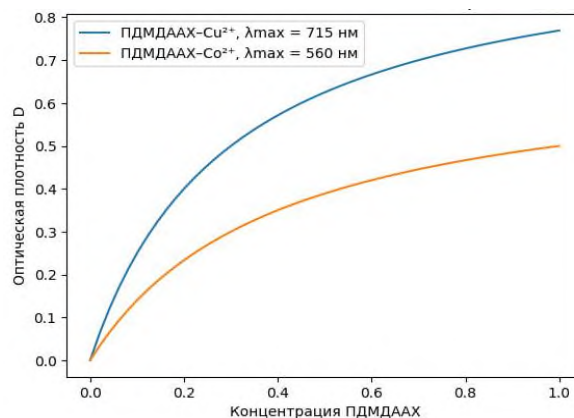


Рисунок 2 – Зависимость оптической плотности от концентрации ПМДААХ

Графики зависимости $D = f(\text{ПДМДААХ})$ имели характерный вид кривой насыщения. На начальном участке наблюдался линейный рост оптической плотности, что соответствует постепенному связыванию ионов металла в комплекс. При достижении определённого мольного отношения R ($[\text{ПДМДААХ}]/[\text{M}^{2+}]$) дальнейшее увеличение концентрации полимера не приводило к росту D , что указывает на завершение процесса комплексообразования. Линейный характер начальных участков этих зависимостей в координатах D от $[\text{M}^{2+}]$ (при избытке полимера) подтверждает подчинение системы закону Бугера – Ламберта – Бера для образующегося комплекса. Это является важным аргументом в пользу образования дискретных, стабильных в растворе комплексов, а не просто неспецифической агрегации.

На основе данных были рассчитаны молярные коэффициенты поглощения (ϵ) комплексов:

- для системы ПДМДААХ- Cu^{2+} при $\lambda_{\max} = 715$ нм величина ϵ составила $\sim 120 \pm 15 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$;
- для системы ПДМДААХ- Co^{2+} при $\lambda_{\max} = 560$ нм величина ϵ составила $\sim 85 \pm 10 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Полученные значения ϵ согласуются с литературными данными для d-d переходов в комплексах этих металлов, которые обычно характеризуются невысокими молярными коэффициентами поглощения (порядка 10–100), в отличие от интенсивных полос переноса заряда [18]. Более высокое значение ϵ для комплекса меди косвенно указывает на возможное участие лигандов с более сильным полем или на наложение переходов другого типа.

На основе спектральных данных можно предположить следующий механизм. Поликатион ПДМДААХ координационно связывает ион металла напрямую через атом азота четвертичной группы, что было бы энергетически невыгодно. Более вероятен сценарий, при котором полимер выполняет роль макросопутствующего иона, электростатически притягивая и удерживая в своём молекулярном клубке комплексный анион металла, например, $[\text{CuCl}_4]^{2-}$ или $[\text{CoCl}_4]^{2-}$, образующийся в растворе при достаточной концентрации хлорид-ионов (от $\text{CuCl}_2/\text{CoCl}_2$ и самого ПДМДААХ-Cl). Образование таких тетрагалогенидных комплексов, особенно для Cu^{2+} (склонного к тетраэдрической геометрии в хлоридных средах), хорошо известно и сопровождается характерным смещением полос поглощения в видимую область. Таким образом, формируется тройной полиэлектролитный комплекс: $\{[\text{ПДМДААХ}]^+n, [\text{MCl}_4]^{2-}, n\text{H}_2\text{O}\}$.

Заключение

В ходе проведённого спектрофотометрического исследования установлено, что полидиметилдиаллиламмоний хлорид (ПДМДААХ) проявляет выраженные комплексообразующие свойства по отношению к ионам меди(II) и кобальта(II) в водных растворах. Определены длины волн максимального поглощения образующихся комплексов: $\lambda_{\max} = 715$ нм для системы ПДМДААХ- Cu^{2+} и $\lambda_{\max} = 560$ нм для системы ПДМДААХ- Co^{2+} . Наблюдаемое смещение по сравнению с аквакомплексами металлов свидетельствует о существенном изменении их лигандного окружения и геометрии. Полученные результаты расширяют представления о взаимодействии катионных полиэлектролитов с ионами переходных металлов и подтверждают перспективность использования ПДМДААХ не только в качестве флокулянта,

но и как компонента для создания функциональных материалов – сорбентов, мембран, систем медленного высвобождения ионов металлов или их селективного извлечения.

Библиография

1. Hoover M.F. Cationic Quarternery Polyelectrolytes // *J. Macromol. Sci.-Chem.* 1970. V. 4. N. 6. P. 1293–1300.
2. Папков В.С., Куряев А.К. Полиэлектролитные комплексы в растворах и на границах раздела фаз // *Успехи химии.* 1998. Т. 67, № 10. С. 958–975.
3. Lancaster L.E., Bassei L., Panzer H.P. The Structure of Poly(Diallyl dimethylammonium) Chloride by ^{13}C -NMR spectroscopy // *J. Polym. Sci.* 1976. V. 14. P. 549–554.
4. Johns S.R., Willing R.L., Middleton S., Ong A.K. Cyclopolymerization. VII. The ^{13}C -NMR Spectra of Cyclopolymers obtained from N, N-Diallylamines // *J. Macromol. Sci.-Chem. A.* 1976. V. 10, N 5. P. 875–891.
5. Меншуткин Н.А. О взаимном влиянии атомов в органических соединениях. СПб., 1980. 823 с.
6. Dehmlow E.V., Dehmlow S.S. Phase Transfer Catalysis. Weinheim: VCH. 1993. 316 p.
7. Шварц А.М., Первикова Г.В. Поверхностно-активные вещества: Справочник. Л.: Химия, 1992. 304 с.
8. Фостер Л.С. Неорганическая химия четвертичных аммониевых солей // *Успехи химии.* 1970. Т. 39, № 9. С. 1672–1690.
9. Kissa E. Fluorinated Surfactants and Repellents. New York: Marcel Dekker, 2001. 640 p.
10. Sommelet M. Sur un nouveau mode de rearrangement // *Compt. Rend.* 1937. V. 205. P. 56.
11. Stevens T.S. et al. A New Type of Molecular Rearrangement // *J. Chem. Soc.* 1932. P. 3193–3197.
12. Мацоян С.Г., Погосян Г.М., Джагамян А.О., Мушегян А.А. Исследование в области циклической полимеризации и сополимеризации. Изучение циклической полимеризации N-замещенных диаллиламинов // *Высокомолекулярные соединения.* 1963. Т. 5, № 6. С. 854–860.
13. Bolto B., Gregory J. Organic polyelectrolytes in water treatment // *Water Research.* 2007. V. 41. P. 2301–2324.
14. Справочник химика. Том III. М.-Л.: Химия, 1964. 505 с.
15. Альмова А.А. Синтез и исследование физико-химических свойств поли-N,N-лиаллиламиноэтановой кислоты // *В мире научных открытий.* 2001. № 9. С. 355–362.
16. Аносов В.Я., Погодин С.А. Основные начала физико-химического анализа. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 876 с.
17. Альмова А.А. Синтез и полимеризация диаллиловых мономеров на основе производных карбоновых кислот: дисс. канд. хим. наук. Нальчик: КБГУ, 2013. 146 с.
18. Левер А.Б.П. Электронные спектры неорганических соединений. М.: Мир, 1987. 22 с.

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 547.741

**Пирролсодержащие гетероциклические соединения:
современные подходы и перспективные направления**

Юрий Исрафилович Мусаев¹, Элеонора Борисовна Мусаева², Карина Руслановна Кожемова³, Артур Эльдарович Байказиев⁴, Амина Суадиновна Виндижева⁵, Алина Руслановна Портова⁶, Станислав Дмитриевич Пак⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

¹ musaev41@mail.ru

² musaeva.45@mail.ru

³ kozhemova88@mail.ru

⁴ arturbay1991@gmail.com

⁵ amina.vindizheva@mail.ru

⁶ akozhemova@bk.ru

Аннотация. Подробно рассмотрены методы синтеза, структурные особенности, физико-химические свойства, способы модификации и области применения полипирролов и содержащих пиррольные группы полимеров. Особое внимание уделено развитию исследований и разработки новых направлений применения данных материалов.

Ключевые слова: полипирролы, конъюгированные полимеры, допирование полипирролов

Для цитирования: Мусаев Ю.И., Мусаева Э.Б., Кожемова К.Р., Байказиев А.Э., Виндижева А.С., Портова А.Р., Пак С.Д. Пирролсодержащие гетероциклические соединения: современные подходы и перспективные направления // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 73–77.

CHEMISTRY

Original article

Pyrrole-containing heterocyclic compounds: modern approaches and promising directions

Yuri I. Musaev¹, Eleonora B. Musaeva², Karina R. Kozhemova³, Artur E. Baykaziev⁴, Amina S. Vindizheva⁵, Alina R. Portova⁶, Stanislav D. Pak⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Kabardino-Balkarian State University, Nal'chik, Russia

¹ musaev41@mail.ru

² musaeva.45@mail.ru

³ kozhemova88@mail.ru

⁴ arturbay1991@gmail.com

⁵ amina.vindizheva@mail.ru

⁶ akozhemova@bk.ru

Abstract. Synthesis methods, structural features, physico-chemical properties, modification methods and applications of polypyrroles and polymers containing pyrrole groups are considered in detail. Special attention is paid to the prospects for further research and development of new directions in the application of these unique materials.

Keywords: polypyrroles, conjugated polymers, polypyrrole doping

For citation: Musaev Yu.I., Musaeva E.B., Kozhemova K.R., Baikaziev A.E., Vindizheva A.S., Portova A.R., Pak S.D. Pyrrole-Containing Heterocyclic Compounds: Modern Approaches and Promising Directions // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):74–77.

Введение

Разработка синтетических способов получения полимеров и изучение их свойств велись еще с конца прошлого века. Благодаря своей уникальной химической структуре, полипиррол обладает исключительными электронными характеристиками, что позволяет использовать его в качестве материала для электронных устройств, суперконденсаторов, коррозионностойких покрытий и даже в медицинских целях. Полипиррол представляет собой важный представитель класса π -конъюгированных полимеров, отличающихся высокими значениями электрической проводимости и способностью к легкому допированию различными анионами и катионами. Этот материал оказался крайне востребованным благодаря сочетанию простоты синтеза, стабильности и широких возможностей функционального дизайна, позволяющего адаптировать его под конкретные технологические нужды [1].

Пирролы – пятичленные азотсодержащие гетероциклы с уникальной электронной структурой – занимают ключевое место в современной органической химии. Их значимость обусловлена широким применением в различных областях:

в фармацевтике – ядро пиррола входит в структуру природных антибиотиков (например, хлормицетина), противоопухолевых агентов и ингибиторов киназ;

в материаловедении – пиррольные полимеры служат основой для проводящих материалов, OLED-дисплеев и сенсоров;

в агрохимии – производные пиррола применяются как регуляторы роста растений и инсектициды.

Особая электронная плотность пиррольного кольца (ароматический секстет из 6 π -электронов) обеспечивает высокую реакционную способность, позволяя создавать сложные молекулярные ансамбли.

Для синтеза полипирролов используются два главных подхода: химическое окисление и электрохимическое осаждение. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки.

Химический синтез полипирролов осуществляется путем окислительной полимеризации мономера пиррола, катализируемого металлическими солями, пероксидами или комплексообразующими реагентами. Основными преимуществами этого метода являются простота реализации и доступность оборудования. Однако его недостатком остается низкая воспроизводимость результатов, вызванная случайным распределением дефектов и неоднородностью продукта. Примеры наиболее распространенных методик включают использование хлорида железа (III) и персульфата аммония [2].

Электрохимический метод основан на инициировании реакции полимеризации пиррола посредством электродных реакций. Преимуществом этого способа является точное управление структурой и толщиной пленки, однако этот процесс требует специального оборудования и тщательного контроля параметров процесса. Наиболее распространенными методами являются гальваностатический режим и потенциодинамическое осаждение.

Структурные особенности полипирролов зависят от условий синтеза, типа растворителя, температуры и концентрации исходных веществ. Получаемые материалы варьируются от аморфных пленок до кристаллических частиц и волокон. Кристалличность полипиррола влияет на электронную проводимость и общую производительность устройства. Для улучшения функциональных характеристик часто комбинируют различные методы синтеза и условия роста. Одним из ключевых факторов, влияющих на структуру полипиррола, является степень ориентации цепей макромолекул, определяемая условиями синтеза. Регулирование степени кристалличности позволяет получать материалы с заданными электрофизическими параметрами, оптимизируя тем самым эффективность конечного изделия.

Физико-химические свойства полипирролов определяются электронной структурой и конфигурацией молекул. Основные характеристики включают высокую электрическую проводимость, стабильность, чувствительность к окружающей среде и хорошую адгезию к различным поверхностям. Благодаря этим свойствам полипиррол востребован во многих областях [3].

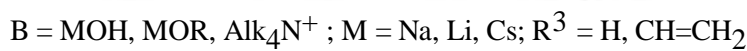
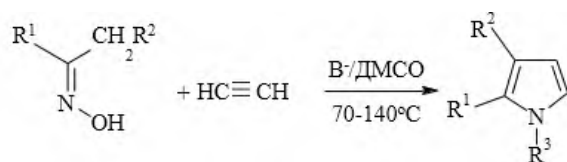
Основные физические свойства полипирролов характеризуются низкой плотностью, высоким коэффициентом преломления света и возможностью изменения цвета в зависимости от среды. Например, изменение pH или приложенного напряжения может вызвать заметные изменения окраски полимера, что используется в разработке индикаторных датчиков и переключаемых оптических элементов.

Электрические свойства также играют ключевую роль в функционировании многих устройств. Проведены многочисленные исследования по изучению механизмов переноса заряда в полипирролах, выявляющие зависимость электрического сопротивления от величины допирования и состава окружения.

Модифицирование полипирролов проводится с целью улучшения эксплуатационных качеств, увеличения прочности, снижения стоимости и расширения сферы применения. Один из популярных способов – введение функциональных групп непосредственно в цепь полимера, а также создание композитов с металлами, оксидами металлов, углеродными материалами и биологически активными веществами. Например, получение композитных материалов на основе полипиррола и графена существенно улучшает механическую прочность и устойчивость к агрессивным средам. Другое направление – соединение полипиррола с магнитными материалами, позволяющее создавать уникальные системы для очистки воды и воздуха. Помимо химической модификации, широкое распространение получили методы поверхностной обработки, позволяющие изменять электрические и оптические свойства поверхности полимера. Это достигается путём добавления специальных агентов, улучшающих взаимодействие с окружающими элементами и увеличивающих долговечность изделий.

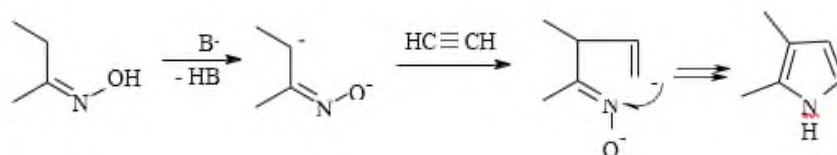
Экспериментальная часть

Конденсация кетоксимов с ацетиленом требует применения суперосновных сред, в качестве которых используют гидроксиды щелочных металлов или тетраалкиламмония в диметилсульфоксиде. (реакция может сопровождаться винилированием образующихся пирролов).

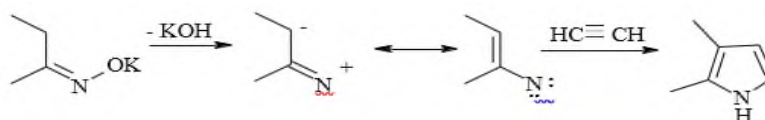


Предложено три возможных механизма процесса:

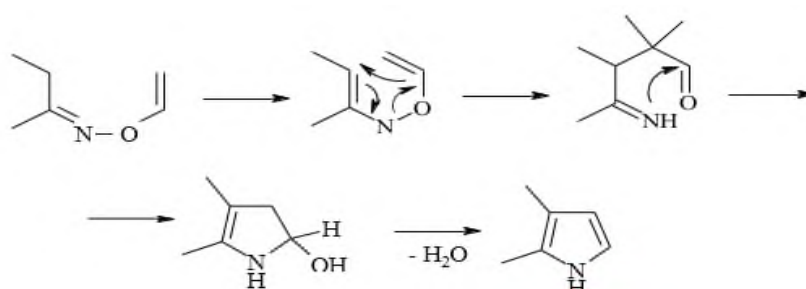
1. Нуклеофильная атака ацетилена карбанионом кетоксима



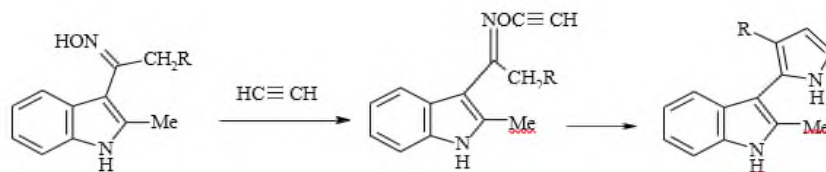
2. 1,3-Дегидратация кетоксима и присоединение 1,3-диполя (или мезомерного нитрена) к ацетилену:



3. [3,3]-Сигматропный сдвиг в промежуточных О-винилоксимах

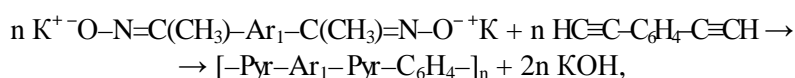


Экспериментальные данные свидетельствуют в пользу [3,3]-сигматропного механизма. Так, на примере оксимов 3-ацетилиндолов удалось выделить промежуточные О-винилоксимы, а затем превратить их в соответствующие пирролы:



В результате анализа указанных исследований было принято решение о синтезе пирролсодержащих соединений методом высокотемпературной поликонденсации с учетом механизма реакции Трофинова. Синтез осуществляли по схеме реакции, предложенной ниже [4].

Синтез полифениленэфиркетонпирролоксимата (ПФЭКПО) проходит по следующей схеме:



где $\text{Ar}_1 = \{ \text{C}_6\text{H}_4\text{OC}_6\text{H}_4\text{C}(\text{CH}_3)=\text{N}-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4\text{COC}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{N}=\text{C}(\text{CH}_3)\text{C}_6\text{H}_4\text{OC}_6\text{H}_4 \}$, Pyr – фрагмент пиррольного кольца = $(\text{C}_4\text{H}_2\text{NH})$.

Полученный полимер растворялся в органических растворителях, таких как ДМСО, хлороформ. Отметим, что полифениленэфирпирролоксимат обладал высокой адгезией к стеклу [4–6].

Было установлено, что при синтезе полифениленэфирпирролов исходные мономеры необходимо использовать в строго эквимолекулярных соотношениях из соображений соблюдения баланса функциональных групп (основное условие получения полимеров высокой молекулярной массы при полигетероциклизации и поликонденсации). Структуры полученных соединений были подтверждены ИК- и ЯМР спектроскопией (Таблица 1).

Таблица 1 – Результаты ИК-ЯМР-спектроскопии синтезированных мономеров и (со)полимеров

Брутто формула НДКО и ЭЗ полимера	Обобщенные данные ν , cm^{-1} и d , ^1H м.д.	
	ν , cm^{-1}	d , ^1H м.д.
М-1 $\text{C}_{42}\text{H}_{34}\text{O}_4\text{N}_4$	715, 734, 1309, 1500, 1593, (-Pyr-, -Ph-); 1241 (Ph-O-Ph); 1405–1413 (C=N-O); 3000-3300 (-OH)	2,25 (-N=C-CH ₃); 6,65, 6,57 (Pyr-H); 7,05; 7,95 (Ar-H); 8,03 (N-H); 11,05 (-OH)
М-2 $\text{C}_{36}\text{H}_{24}\text{ON}_2$	1241(Ph-O-Ph), 1405-1413 (C=N-O); 2215-2220 (C≡C); 3252 (N-H)	2,65(-C≡CH); 6,65, 6,57 (Pyr-H); 7,05; 7,7; 7,95 (Ar-H); 8,03(N-H);
ПФЭП $\text{C}_{26}\text{H}_{18}\text{ON}_2$	715, 725, 1310, 1595 (-Pyr-, -Ph-); 1242 (Ph-O-Ph); 3400 (-NH)	8,03 (N-H); 7,09, 7,14, 7,27 (-Ph-H); 6,65, 6,57 (-Pyr-H)

Заключение

С использованием реакций неравновесной поликонденсации и полигетероциклизации был разработан способ получения нового сополимера (полиэфиркетонпирролоксимат), обладающий комплексом ценных свойств: повышенной прочностью, термо-, тепло- и коррозионной стойкостью, химической устойчивостью, в ряде случаев электропроводностью после допирования, что позволяет их использовать в авиационной, космической, электро- и радиотехнике, хирургии, химическом машиностроении, строительной, легкой и других отраслях промышленности.

Синтезы сополимеров можно рассматривать как целенаправленные процессы создания структур более сложного и разнообразного (со)полимерного дизайна.

Современное состояние науки и промышленности показывает высокий потенциал полипирролов и пирролсодержащих полимеров для множества технологических приложений. Несмотря на достигнутые успехи, остается ряд нерешенных проблем, таких как повышение эффективности процессов синтеза, улучшение механических свойств и расширение ассортимента прикладных продуктов. Дальнейшие

исследования в области функционализации и оптимизации электрических характеристик позволят значительно расширить область применения этих перспективных материалов.

Библиография

1. Трофимов Б.А., Коростова С.Е., Собенина Л.Н. Пирролы из кетоксимов и ацетилену // *Химия гетероциклических соединений*. 1982. № 2. С. 193–198.
2. Мусаев Ю.И., Мусаева Э.Б., Микитаев А.К. Анализ данных потенциометрического титрования и ПМР-спектроскопии фенолов и дифенолов в неводных средах // *Электронный журнал «Исследовано в России»*, 1999. Т. 50. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/1999/050.pdf>
3. Мусаев Ю.И. Особенности синтеза и механизмы реакций получения полиарилатов, простых ароматических полиэфиров и полипирролов в неводных средах: дисс. ... д-ра хим. наук. Нальчик, 2004. 343 с.
4. Кожемова К.Р. Синтез новых пирролсодержащих мономеров и полимеров реакцией поли(гетеро)циклизации: дисс. ... канд. хим. наук. Нальчик, 2015. 120 с.
5. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы: учебное пособие. Ч. 1. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 118 с.
6. Жеребкер К.Я., Родионов А.Н., Ильин М.М., Корлюков А.А., Архипов Д.Е., Белоусов Ю.А., Сименел А.А. Синтез и свойства N-ферроценилалкилированных пирролов // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2014. Т.63, № 10. С. 2281–2284.

Требования к оформлению научной статьи, представляемой в журнал «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета»

Для публикации в журнале «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета» принимаются статьи на русском или английском языках, содержащие результаты актуальных фундаментальных и прикладных исследований, передовых наукоемких технологий, научных и научно-методических работ.

1. Основные документы, необходимые для публикации

1.1. Один экземпляр статьи в бумажном виде и на электронном носителе отдельным файлом (на диске); на наклейке диска (дискеты) (обязательно!) указываются фамилия автора (авторов) и название статьи.

1.2. Полные сведения об авторе (авторах) на русском и английском языках в бумажном виде и в электронном варианте, оформленном отдельным от статьи файлом, который включает в себя следующие данные:

- фамилия, имя, отчество (полностью) каждого автора;
- место работы (наименование организации), ученая степень, ученое звание, должность каждого автора;
- контактные телефоны, почтовый индекс и адрес, адрес электронной почты (e-mail) каждого автора.

1.3. Сопроводительное письмо на бланке учреждения, где выполнена работа.

1.4. Внешняя рецензия доктора наук (по желанию).

1.5. Акт экспертизы о возможности опубликования в открытой печати – для физико-математических, химических, биологических, технических, экономических наук и науки о земле.

1.6. Справка об учебе в аспирантуре или докторантуре для аспирантов и докторантов.

1.7. «Лицензионный договор» (один на авторский коллектив) в 2-х экз. Без Договора статья не будет опубликована. Текст Договора размещен на сайте журнала «Известия КБГУ».

2. Правила оформления статьи

2.1. Объем статьи – в пределах 10 страниц формата А4, интервал – 1,5, размер шрифта Times New Roman Cyr 14 пт; поля страницы: слева – 3 см, справа – 1 см, сверху – 2,0 см, снизу – 2,5 см.

Краткие сообщения – в пределах 4 машинописных страниц, включающих не более 2 рисунков и 2 таблиц.

2.2. Статья должна включать:

- индекс УДК (универсальная десятичная классификация) в верхнем левом углу;
- название статьи (на русском и английском языках);
- фамилию, имя, отчество автора (авторов) (на русском и английском языках);
- реферат статьи (до 500 знаков) (на русском и английском языках);
- ключевые слова (5–7 слов на русском и английском языках);
- текст статьи, отражающий цель исследования, методы работы, собственно исследования, конкретные выводы;
- литературу (в библиографическом списке нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте; номер источника в тексте указывается в квадратных скобках – автоматическая нумерация ссылок не допускается);

- подпись автора (авторов).

2.3. Иллюстрации к статье (рисунки, фотографии) должны быть черно-белыми, четкими (разрешение не менее 300 dpi, расширение *.jpg) и вставлены в текст. Обычный размер иллюстраций – не более половины листа А4. Формулы и символы помещаются в текст с использованием редактора формул Microsoft Education. Таблицы вставляются в текст; ссылки на рисунки и таблицы обязательны; названия таблиц и подрисуночных подписей обязательны.

2.4. Нумерация страниц обязательна.

2.5. Тип файла в электронном виде – RTF.

Образцы оформления литературы:

книга

Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. М.: Наука, 1973. 210 с.

Интегральные схемы: Принципы конструирования и производства / под ред. А.А. Колосова. М.: Сов. радио, 1989. 280 с.

статья из книги, сборника, журнала

Петренко В.И., Доготь А.Я. Пневмогидравлический кавитационный процесс // Геодинамические основы прогнозирования нефтегазоносности недр: тезисы докладов 1-й Всесоюзной конференции. М., 1988. Ч. 3. С. 616–617.

Хлынов В.А. Общегосударственное планирование рыночной экономики: Опыт Японии // Экономист. 1994. № 4. С. 89–94.

Базаров А.Ж. О некоторых нелокальных краевых задачах для модельных уравнений второго порядка // Известия вузов. Математика. 1990. Т. 2, № 3. С. 11–15.

диссертации и авторефераты диссертаций

Ерков С.А. Формирование художественного восприятия произведений изобразительного искусства на уроках изобразительного искусства в 5, 6 классах средней общеобразовательной школы: дисс... канд. пед. наук. М., 2006. 184 с.

Вахромов Е.Е. Психологические особенности самоактуализации подростков с отклоняющимся поведением: автореф. дисс... канд. психол. наук. М., 2003. 30 с.

патент

Патент РФ № 2102404. Способ получения полиэфиров / В.Н. Тамазина. Опубл. 20.01.1998 г. Бюлл. № 2.

электронный ресурс

Электронный ресурс: Чубыкин А. Российский рынок ПЭТ-пленок // Флекс Плюс. 2004.
https://plastinfo.ru/information/news/19255_04.03.2013/

При оформлении иностранной литературы необходимо придерживаться тех же правил, что и для русскоязычных источников. Вместо символа «№» в английском языке ставится буква «N».

При формировании списка литературы необходимо указать не менее 2-х ссылок на статьи из журнала «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета».

При несоблюдении указанных правил редакция оставляет за собой право не публиковать статью.

3. Порядок рецензирования

3.1. Рукопись направляется на рецензирование ведущим специалистам в данной области (внешнее и внутреннее рецензирование).

3.2. Результаты рецензирования редакция сообщает автору по электронной почте.

3.2. По результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материала, о чем дополнительно сообщается автору.

4. Заявление о конфиденциальности

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте этого журнала, будут использованы исключительно для целей, обозначенных этим журналом, и не будут использованы для каких-либо других целей или предоставлены другим лицам и организациям.

Статьи представляются в редакционно-издательский отдел ИПЦ КБГУ.

Адрес ИПЦ КБГУ: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

Контактный телефон: (8662) 72-23-13.

E-mail: rio@kbsu.ru, izvestia_kbsu@mail.ru. E-mail-адрес защищен от спам-ботов, для его просмотра у вас должен быть включен Javascript.

Ответственный секретарь редакционной коллегии – **Долбин Игорь Викторович**.

После положительного решения редколлегии о публикации статьи в журнале «Известия КБГУ» автор (или авторы) статьи перечисляет на р. сч. КБГУ плату из расчета 400 руб. (в т.ч. НДС) за страницу рукописи.

Назначение платежа: редакционно-издательские услуги («Известия КБГУ»), код дохода 07430201010010000130, разрешение № 0732069510 от 30.03.05 г. пункт 1. В стоимость входят расходы по доставке журнала по территории России. Автор (или авторы) статьи получает 2 экземпляра журнала бесплатно.

Для выкупа дополнительных номеров журнала необходимо передать в редакцию (ИПЦ КБГУ) письмо-заявку с указанием номера и количества экземпляров журнала и перечислить на р. сч. КБГУ плату из расчета 400 руб. (в т.ч. НДС) за один экземпляр журнала с назначением платежа: редакционно-издательские услуги (за журнал «Известия КБГУ»), код дохода 07430201010010000130, разрешение № 0732069510 от 30.03.05 г. пункт 1.

Реквизиты КБГУ для платежей:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова» (КБГУ)

Почтовый и юридический адрес:

360004, Кабардино-Балкарская Республика,

г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Телефон: 42-25-60,

Voice/fax: +7(495) 3379955

Телетайп: 257245 «Альфа»

E-mail: yka@kbsu.ru

ОКПО 02069510

ОКОНХ 92110

ОГРН 1020700739234 от 22.07.11 г.

ОКОГУ 13240

ОКАТО 83401000000

ОКЭВД 80.30.1

ОКОПФ 72

ОКФС 12

Банковские реквизиты:

Получатель:

ИНН 0711037537/ КПП 072501001

Отдел № 1 УФК по Кабардино-Балкарской Республике
(0401 КБГУ л/с 20046Х17540)

Банк получателя:

ГРКЦ НБ Кабардино-Балкарск. Респ. Банка России

г. Нальчика

БИК 048327001

Р/с 40501810100272000002

КБК 00000000000000000130

Копия платежного документа передается или высылается в редакцию журнала по электронной почте.

Стоимость журнала по подписке, согласно Каталогу «Пресса России», с учетом расходов по доставке журнала по территории России, составляет 450 руб. (в т.ч. НДС).

Копия платежного документа передается или высылается в редакцию журнала по электронной почте.

ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

PROCEEDINGS OF THE KABARDINO-BALKARIAN STATE UNIVERSITY

ТОМ XVI, № 1, 2026

Редактор *Р.М. Шаутаева*
Компьютерная верстка *Е.Л. Шериевой*
Корректор *Л.М. Хакулова*

В печать 25.03.2026. Формат 60×84 ¹/₈.
9,30 усл.п.л. 9,0 уч.-изд.л.
Дата выхода в свет 31.03.2026.

Адрес издателя: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173,
Кабардино-Балкарский государственный университет

Печать трафаретная. Бумага офсетная.
Тираж 1000 экз. Заказ №

Адрес типографии: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173,
Кабардино-Балкарский государственный университет.
Производственно-техническое управление. Полиграфический участок